

**SISTEMATIZACION DEL BALANCE TERMICO EN LA MAQUINA 4
DE PROPAL S.A.**

**POOL DAVID LOPEZ BOLAÑOS
CARLOS ANDRES VERA DIAZ**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA
PROGRAMA INGENIERIA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2008**

**SISTEMATIZACION DEL BALANCE TERMICO EN LA MAQUINA 4
DE PROPAL S.A.**

**POOL DAVID LOPEZ BOLAÑOS
CARLOS ANDRES VERA DIAZ**

**Pasantía para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

**Director
ALFREDO ARAGON
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA
PROGRAMA INGENIERIA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2008**

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de grado en
Cumplimiento de los requisitos
exigidos por la Universidad
Autónoma de Occidente para optar
al título de Ingeniero Mecánico

Ing. ALFREDO ARAGON

Director

Santiago de Cali, 29 de Marzo de 2008

AGRADECIMIENTOS

ING. RICARDO HOYOS

ING. JORGE TORRES

PERSONAL DE PROPAL S.A.

ING. HAROLD VALENCIA

ING. ALFREDO ARAGON

ING. CRISTIAN CHAMORRO

ING. RICARDO VIDAL

DR. LINDA LEINS BOLAÑOS

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	16
RESUMEN	18
INTRODUCCION	19
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
2. JUSTIFICACION	22
3. OBJETIVOS	23
3.1 OBJETIVOS GENERAL	23
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
4. ANTECEDENTES	24
5. MARCO TEORICO	26
5.1 EL VAPOR	26
5.1.1 Propiedades termodinámicas del vapor	27
5.1.2. Fracción de sequedad o calidad del vapor	29
5.1.3 Vapor flash	30
5.2 AIRE	31
5.2.1 Humedad específica y relativa del aire	31
5.2.2 Temperatura de punto de rocío	31
5.2.3. Temperatura de bulbo húmedo	32
5.2.4 Propiedades termodinámicas del aire	33

5.3 TRANSFERENCIA DE CALOR	34
5.3.1 Conducción	34
5.3.2 Convección	35
5.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	44
5.4.1 Extracción de agua en la máquina de papel	44
5.4.2 Proceso de secado	45
5.4.3 Criterios de funcionamiento	49
5.4.4 Zonas de evaporación	50
5.4.5 Configuración de los cilindros en la sección de secado	51
5.4.6 Secciones de secado máquina de papel número cuatro (4) de PROPAL S.A	53
5.4.7 Elementos que componen las secciones de secado de una máquina de papel	54
5.4.8 Sistema de vapor y condensado	66
5.4.9 Proceso de secado en la MP-4 (Máquina de papel 4) según el flujo de vapor y condensado	68
5.4.10 Sistema de ventilación	72
5.4.11 Sistema de ventilación máquina de papel número cuatro (4) de PROPAL S.A.	74
6. MODELO TERMODINAMICO	84
6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE SECADO	84
6.2 EL MODELO	86
6.2.1. Balance de masa papel	89

6.2.2	Balance de masa para el cilindro secador	91
6.2.3	Balance de energía para el papel	92
6.2.4	Balance de energía para el cilindro secador	94
6.2.5	Pérdidas de calor en los cilindros secadores	100
6.2.6	Consumo de vapor en secadores	102
6.2.7	Balance de masa y energía para el aire en la campana	102
6.2.8	Pérdidas de calor en superficies	111
6.2.9	Pérdidas de calor debidas a fugas de vapor	118
6.2.10	Eficiencia del proceso	119
6.2.11	Costo de la energía	120
7.	PROGRAMA	122
7.1	INSTALACION DEL PROGRAMA	122
7.2	MANEJO DEL PROGRAMA	123
7.2.1.	Comando secado de papel	124
7.2.2.	Comando sistema de ventilación	133
7.2.3	Comando pérdida de calor por superficies	137
7.2.4	Comando pérdidas de calor por fugas de vapor	144
7.3	CAPTURA DE ERRORES	145
8.	METODOLOGIA	147
9.	RESULTADOS	150
9.1	ANALISIS DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE SECADO	150

9.1.1 Temperaturas del vapor, de la superficie de los cilindros secadores y del papel	150
9.1.2 Contenido de humedad en los bolsillos	154
9.1.3 Fuerza de secado en función de las presiones de vapor del ambiente y el papel	156
9.2 RESULTADOS OBTENIDOS POR MEDIO DEL PROGRAMA	158
9.2.1 Resultados máquina de papel cilindros secadores	158
10. CONCLUSIONES	169
BIBLIOGRAFIA	171
ANEXOS	173

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparación entre el sifón estacionario y el rotativo	62
Tabla 2. Cuadro comparativo sistema cascada vs. Termocompresor	68
Tabla 4. Características técnicas de los ventiladores de extracción	76
Tabla 5. Temperatura del aire en los ductos de extracción	77
Tabla 6. Distribución de intercambiadores de calor	79
Tabla 7. Características técnicas de los ventiladores.	80
Tabla 8. Intercambiadores de calor	81
Tabla 9. Características técnicas de los ventiladores	83
Tabla 10. Temperatura del aire después del intercambio de calor	83
Tabla 11. Medición de variables	148
Tabla 12. Resultados grupos de cilindros sección de pre-secado	159
Tabla 13. Resultados grupos de cilindros sección post-secado	160
Tabla 14. Sistema de Ventilación Hood de pre-secado	162
Tabla 15. Sistema de Ventilación Hood de post-secado	163
Tabla 16. Resultados grupos de cilindros sección pre-secado.	165
Tabla 17. Resultados grupos de cilindros sección post-secado.	166

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva de saturación del vapor	27
Figura 2. Relación entre la presión del vapor y el volumen específico	29
Figura 3. Sistema de secado y sus equipos	46
Figura 4. Evaporación en la hoja de papel.	47
Figura 5. Configuración típica de un sistema de secado de papel	48
Figura 6. Vista del bolsillo (pocket)	49
Figura 7. Curva de secado	51
Figura 8. Configuración de hilera simple	52
Figura 9. Configuración de doble hilera	53
Figura 10. Pre-secado	53
Figura 11. Post-secado	54
Figura 12. Duo-Stabilizer	55
Figura 13. Blow Box	56
Figura 14. Cilindro secador	57
Figura 15. Comportamiento de la película de condensado	58
Figura 16. Resistencias térmicas del secador	60
Figura 17. Junta rotatoria	61
Figura 18. Tipos de sifones	62

Figura 19. Barras de turbulencia	64
Figura 20. Distancia óptima entre barras	65
Figura 21. Sistema cascada. Utilización del vapor de arrastre	66
Figura 22. Sistema termo-compresor	67
Figura 23. Boquilla Termo-compresor	68
Figura 24. Sistema representativo del sistema de vapor y condensado de la MP-4	71
Figura 25. Proceso de ventilación de bolsillo	73
Figura 26. Métodos de ventilación pockets	74
Figura 27. Representación de un intercambiador de calor tipo VLF.	76
Figura 28. Grupo extractor de aire húmedo	77
Figura 29. Puntos para la toma de temperaturas del aire	81
Figura 30. Posibles puntos de toma de temperatura	87
Figura 31. Flujos involucrados en el proceso	88
Figura 32. Volumen de control	89
Figura 33. Flujo de calor a través de cada resistencia térmica	96
Figura 34. Volumen de control en la campana	102
Figura 35. Volumen de Control Techo	110
Figura 36. Ducto.	113
Figura 38. Ventana datos generales de producción.	124
Figura 39. Comentario de campo de entrada.	125
Figura 40. Ventana secado de papel.	126

Figura 41. Caja de entrada volátil	126
Figura 42. Ventana de secado de papel (barra de progreso visible)	127
Figura 43. Ventana volátil	128
Figura 44. Ventana resultados	129
Figura 45. Ventana otros resultados	130
Figura 46. Ventana costo de la energía	131
Figura 47. Ventana volátil relación de combustibles.	131
Figura 48. Ventana costo de la energía (campo de entrada adicional)	132
Figura 49. Ventana ventilación campana.	133
Figura 50. Ventana ventilación campana (señalamiento por medio de figuras verdes)	134
Figura 51. Ventana valores por sección	135
Figura 52. Ventana datos de producción	136
Figura 53. Ventana cálculos	137
Figura 54. Ventana pérdida de calor por superficies	138
Figura 55. Primer campo desplegable de selección (TIPO DE SUPERFICIE)	138
Figura 56. Segundo campo desplegable de selección (MATERIAL DE LA SUPERFICIE)	139
Figura 57. Ventana otro material	139
Figura 58. Tercer campo desplegable de selección (MATERIAL DE LA CHAQUETA DEL AISLAMIENTO)	140
Figura 59. Cuarto campo desplegable de selección (TIPO DE FLUIDO)	140
Figura 60. Quinto campo desplegable de selección (DIAMETRO NOMINAL DEL TUBO)	140

Figura 61. Ventana diámetros	141
Figura 62. Ventana pérdida de calor por superficies (opciones)	141
Figura 63. Ventana pérdida de calor por superficies (TEMPERATURA DEL FLUIDO EN EL TUBO CONOCIDA)	142
Figura 64. Ventana pérdida de calor por superficies (campos de entrada para las dimensiones de la superficie)	143
Figura 65. Ventana volátil (CONFIRMACION DE LA OPERACIÓN A REALIZAR)	143
Figura 66. Ventana costo de las pérdidas por año	144
Figura 67. Pérdidas por fugas de vapor	145
Figura 68. Mensaje de error valores nulos o campos vacíos	145
Figura 69. Curva teórica temperatura superficial del secador vs. Temperatura del papel	151
Figura 70. Sugerencia para la toma de temperatura en el papel	169

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Temperatura de la superficie del secador, del papel y el vapor	153
Gráfica 2. Temperatura superficial del secador vs. Temperatura del vapor	154
Gráfica 3. Temperatura de bulbo húmedo vs. Temperatura bulbo seco	155
Gráfica 4. Humedad absoluta vs. Humedad saturación	156
Gráfica 5. Fuerza de evaporación	158
Gráfica 6. Humedad específica del papel versus número de cilindro secador (pre-secado)	160
Gráfica 7. Humedad específica del papel versus número de cilindro secador (post-secado)	162
Gráfica 8. Humedad específica del papel versus número de cilindro secador (pre-secado)	166
Gráfica 9. Humedad específica del papel versus número de cilindro secador (post-secado)	168

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Emisividad de los materiales más comunes	173
Anexo B. Propiedades térmicas de algunos elementos metálicos	176
Anexo C. Propiedades térmicas de algunas aleaciones	177
Anexo D. Datos de operación (Septiembre 05 2007)	178
Anexo E. Datos de operación (Octubre 06 2007)	181
Anexo F. Datos de producción (Octubre 12 2007)	185
Anexo G. Datos de producción (Noviembre 10 2007)	188
Anexo H. Programa	190

GLOSARIO

BROKE: es el resultado de los desperdicios del papel que son reutilizados en el proceso.

CALOR: forma de energía transferida entre dos cuerpos debido a la diferencia de temperatura.

CALOR ESPECÍFICO: se define como la capacidad de un cuerpo de almacenar energía en forma de calor por unidad de masa por temperatura.

CALOR SENSIBLE: cantidad de energía que cuando aplicada a un cuerpo o removida del mismo produce un cambio en la temperatura del mismo.

CALOR LATENTE: calor asociado al cambio de estado de una sustancia a temperatura constante.

CARBONATO DE CALCIO: usado en la fabricación del papel como relleno o recubrimiento de pigmentos.

COEFICIENTE CONVECTIVO (COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN): se define como la velocidad de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia de temperatura

CONDUCTIVIDAD TERMICA: es una medida de la capacidad de un cuerpo para conducir energía en forma de calor.

CONSISTENCIA: Contenido en porcentaje de sólidos secos.

DIFUSIVIDAD TERMICA: es la razón entre el calor conducido a través de un material y el calor almacenado por el mismo por unidad de volumen.

EMISIVIDAD: es la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura.

FILLER (RELLENO): es un material o sustancia que se adiciona a los ingredientes de los cuales esta fabricado el papel para suavizar y llenar los espacios entre fibras con el fin de mejorar las propiedades de impresión del papel.

FREENESS: es una medida de la drenabilidad de una suspensión acuosa.

LICOR NEGRO: mezcla producto de la cocción de la fibra y productos químicos disueltos, esta mezcla es recuperada durante el lavado y usada como combustible en la caldera recuperadora.

LIGNINA: sustancia que aparece en los tejidos leñosos de los vegetales y que mantienen unidas las fibras de celulosa que los componen (constituyen el 25 % de la madera).

PESO DEL PAPEL (PESO BASE): peso en gramos por metro cuadrado de papel. En la industria papelera también es conocido como gramaje.

PRECIPITADOR ELECTROSTATICO: usado para limpiar los gases de chimenea y de proceso; elimina entre el 99.5 % y el 99.8 % de las partículas de polvo emitidas en las calderas.

RADIACION: mecanismo de transferencia de calor que tiene lugar de un cuerpo a otro en forma de ondas electromagnéticas.

VISCOCIDAD: es una medida de la resistencia al flujo.

WOODFREE: término con el que se le conoce en la industria papelera a aquellos productos que no contienen lignina.

RESUMEN

En el proceso de secado que se realiza en una máquina de papel, se lleva a cabo la evaporación del agua contenida en la hoja de papel, esto se realiza mediante la transferencia de la energía térmica, proveniente del vapor, hacia el papel húmedo por medio de una serie de cilindros dispuestos por grupos dentro de una sección de secado; en esta fase de la fabricación del papel, los consumos de energía son mayores; por consiguiente, es la parte del proceso más costosa operacionalmente.

En este trabajo se presenta el balance térmico realizado para la sección de secado de la máquina de papel 4 (MP-4) PROPAL S.A., con el fin de modelar de manera aproximada el comportamiento en operación de la máquina en la sección de secado.

Mediante la aplicación de este balance térmico, se pueden obtener los requerimientos energéticos para el proceso, consumos de vapor por grupo de secadores, consumos de vapor para calentamiento del aire, pérdidas energéticas del sistema, eficiencia del proceso y costos de la energía térmica usada en el mismo; esto permite hacer comparaciones entre la operación térmica real de la máquina y la operación esperada, lo cual, puede dar pautas acerca de que camino tomar en la búsqueda de mejorar la eficiencia en la sección de secado. Este balance puede ser aplicado a la mayoría de las máquinas de papel siempre y cuando sean máquinas multicilindros.

Con el fin de facilitar el proceso de cálculo y obtención de resultados se ha sistematizado dicho balance mediante el empleo del programa Visual Basic 6.0 y de esta manera modelar el comportamiento energético de la máquina para diferentes estados de operación de una manera rápida evitando tediosos cálculos, también facilitar la tarea en la búsqueda de una operación óptima del proceso y los ahorros que esto conllevaría.

INTRODUCCION

El proceso de fabricación de papel ecológico para escritura, impresión y oficina a base de fibra de caña de azúcar empieza en los ingenios azucareros donde se obtiene dicha fibra a partir del bagazo de caña, producto de la molienda de la misma; dicha fibra es llevada a la planta de pulpa, donde es cocinada con soda cáustica y vapor a alta temperatura, posteriormente por medio de unos digestores es eliminada parte de la lignina presente en la fibra de caña; un digestor es básicamente un cilindro que en su interior tiene alojado un tornillo el cual transporta la fibra.

Cuando la fibra abandona los digestores va hasta una serie de tanques donde tiene lugar la despresurización, luego la pulpa es separada del licor negro (producto de la cocción) por medio de unos filtros, posteriormente pasa al sistema de limpieza conformado por zarandas y depuradores ciclónicos los cuales constan de unos cilindros perforados y gracias al efecto de la fuerza centrífuga, la diferencia de densidades y tamaños, se realiza la separación gruesa y fina de los materiales indeseables; al final del proceso se obtiene una pulpa de color café lista para ser llevada al proceso de blanqueo si lo que se va a producir es papel blanco.

El proceso de blanqueo consiste en retirar toda la lignina (causante de la coloración café de la pulpa) por medio de una reacción química que ocurre en cada torre de retención y posteriormente se realizan los lavados por filtración en los cuales se eliminan los productos de dicha reacción; una vez terminado este proceso a la pulpa blanqueada se le adicionan diferentes sustancias químicas como carbonato de calcio, encolantes y diversos adictivos, esta mezcla es llevada a unos depuradores ciclónicos donde es limpiada de Nuevo para su posterior uso en la máquina de papel.

Esta mezcla con un gran contenido de agua, es depositada sobre una malla que gira a gran velocidad y por el efecto de la gravedad y el vacío, se retira el agua quedando al final de la malla, una estructura húmeda de fibras entrelazadas. Después, se pasa la hoja de papel por un sistema de prensas y secadores de vapor para eliminar el exceso de humedad que todavía contiene la hoja de papel, por último la hoja pasa por un sistema de rodillos, llamados calandrias, el cual prensa la hoja para dar mejores propiedades de apariencia como lisura, calibre y porosidad. Esta hoja continua de papel es enrollada en bobinas de gran tamaño, llamadas "reeles".

En las plantas de pulpa y papel, el precio del papel está influenciado entre otros muchos factores por el costo de la energía consumida en el proceso, siendo cerca del 80 % de la energía total consumida, energía térmica, la cual es usada en el proceso de cocción, sistemas de calentamiento de aire, secado del papel, pérdidas asociadas a todo proceso térmico, entre otros; tan solo el 20% del consumo energético se hace en forma de energía eléctrica, la cual se destina para el funcionamiento de sistemas de bombeo y cualquier aplicación donde el uso de motores eléctricos es necesario.

En la fabricación del papel, la remoción de agua de la hoja se lleva a cabo en tres sectores de la máquina los cuales operan bajo tres principios diferentes; en el primer sector el agua se extrae de la hoja gracias a la fuerza de gravedad, a las características hidrodinámicas y al empleo de cajas de vacío, en esta fase se remueve el 95.4 % del agua contenida en la hoja y representa en costo 0.014 dólares por tonelada de papel; en el segundo sector el agua es evacuada de la hoja debido a la compresión mecánica ejercida por las prensas, en este sector el 3.2 % del agua es removida de la hoja y representa un costo de 1.9 dólares por tonelada de papel producido; en el tercer sector el agua que no puede ser removida mecánicamente debe ser evaporada mediante la adición de calor a través de los cilindros secadores que conforman la sección de secado, en esta fase solo el 1.4 % del agua es removida y representa un costo de 22 dólares por tonelada de papel producido.

Como se puede apreciar la sección de secado es la fase donde la menor cantidad de agua es evaporada pero donde hay mayor consumo de energía térmica y por lo tanto la fase más costosa del proceso.

Es por esta razón que en las empresas se ha creado una conciencia más profunda acerca del uso racional y eficiente de la energía, pues además de los beneficios ambientales que produce el buen manejo de este recurso, también genera un gran impacto en la economía de la empresa originando grandes ahorros en el capital.

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo pretende exponer un modelo que permite calcular consumos de energía, vapor, condensado y estimación de algunas de las pérdidas en el proceso de secado del papel en la máquina de papel 4 (MP-4) de PROPAL S.A., y así, brindar herramientas para obtener resultados rápidos acerca de los consumos de la máquina y sus costos además de ser una herramienta útil en la tarea de buscar la operación óptima de la sección de secado.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La sección de secado de la máquina de papel 4 de PROPAL S.A. no cuenta con un balance térmico, que permita modelar el comportamiento de la máquina para diferentes condiciones de operación; Lo cual, impide la búsqueda de la operación óptima de la misma, la estimación de los consumos energéticos y el cálculo de consumos de vapor requeridos en los procesos llevados a cabo en el secado de papel, y por consiguiente la cuantificación de la operación de la máquina y las pérdidas más comunes en este tipo de proceso.

Lo anterior crea la necesidad de exponer un modelo que permita calcular consumos de energía, vapor, condensado y estimación de algunas de las pérdidas en el proceso de secado del papel en la máquina de papel 4 (MP-4) de PROPAL S.A., y así, brindar herramientas para obtener resultados rápidos acerca de los consumos de la máquina y sus costos a través de la realización y la sistematización del balance térmico de esta máquina.

2. JUSTIFICACION

Teniendo en cuenta que PROPAL S.A., es una empresa importante en el sector industrial de la fabricación de pulpa y papel, con una misión de ofrecer al mercado mundial y con énfasis en la región Andina, pulpa, papel y productos derivados de clase global, complementados con una oferta de servicio personalizado y oportuno obtenido a través de una cultura de calidad integral, por tal motivo se asume que es de vital importancia, que en la producción de la pulpa y el papel, se realicen procesos eficientes en las áreas en donde el consumo energético es mayor comparado con el proceso en si.

Este consumo energético, se presenta durante todo el proceso de producción, pero, en la fase de secado del papel es mayor si se compara con la cantidad de agua que se tiene que evaporar en esta fase, por lo cual es importante conocer la eficiencia energética de este proceso y contar con una herramienta que permita cuantificar los consumos de energía térmica en el proceso.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GENERAL

Elaborar y sistematizar el balance térmico de la máquina 4 PROPAL S.A.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Actualizar especificaciones térmicas de la máquina 4.
- ✓ Familiarizarse con las máquinas y equipos involucrados en el proceso de secado.
- ✓ Compilar información de equipos para manejo de vapor, condensado, agua y aire caliente en la máquina 4.
- ✓ Sistematizar principales variables operativas para optimizar el uso de energía en el proceso de secado de papel.

4. ANTECEDENTES

La sección de secado de las máquinas de papel es el sector operacional más costoso en cuanto al uso de energía térmica se refiere, de igual forma el impacto medioambiental y económico que esta genera es considerable; por esta razón, es importante que este tipo de procesos operen lo más eficientemente posible y para esto, es necesario contar con un método que permita cuantificar los principales consumos de energía en el proceso.

SUAREZ Mauricio Andrés en su artículo “Modelo para el cálculo de consumo de vapor en máquinas multicilindros”, el cual es una adaptación del modelo de cálculo traducido por la Employer’s Federation of Swedish Forest Industries, muestra de manera muy práctica y general la forma de calcular los consumos de vapor en el proceso de secado de papel, concluyendo que este modelo es muy confiable si la recolección de datos es apropiada y los errores pueden estar en el orden del 3 al 7%; sin embargo, en ocasiones es necesario observar los consumos de vapor por cada grupo de secadores o conocer si el número de cilindros secadores es suficiente cuando se desea aumentar la capacidad de secado y por consiguiente la producción de la máquina¹.

RENDINA Alfredo realizó un artículo sobre la “Capacidad de Secado en Baterías de Secadores” es una tentativa de un método de cálculo que puede ser aplicada a baterías de secadores de máquinas existentes a remodelar; este modelo permite calcular consumos de vapor, condensado, agua evaporada, etcétera².

Todo proceso industrial que requiera una operación eficientemente, debe contar con un sistema de retroalimentado que permita controlar su proceso, por lo tanto muchos estudios se han realizado para ejercer control sobre el proceso. SLÄTTEKE Ola. En su tesis doctoral “Modelling and control of the paper machine drying section” presenta un modelo de la sección de secado de la máquina de papel, el cual es simulado con controles tipo PI (Proporcional – integral) y PID (Proporcional – Integral – Derivativo).

¹ SUAREZ, Mauricio Andrés. Modelo para el cálculo de consumo de vapor en máquinas multicilindros. En: acotepac. Vol. 12, No. 34 (Ene. – Jun. 2003); p. 3 – 6.

² RENDINA, Alfredo. Capacidad de secado en baterías de secadores. En: acotepac. Vol. 15, No. 41 (Jul. – Dic. 2006); p. 3 - 8.

Todos estos trabajos requieren del conocimiento de variables que son difíciles de medir por simple inspección, por lo tanto, es necesario el uso de algunas correlaciones experimentales para determinarlas, como las deducidas por HEIKKILA Pertti "A Study on the Drying Process of Pigment Coated Paper Webs", WIHELSSON Bjorn "An Experimental and Theoretical Study of MultiCylinder Paper Drying" y PERSSON H entre otros en sus respectivas tesis doctorales y trabajos experimentales.

5. MARCO TEORICO

5.1 EL VAPOR

Cuando se aplica energía en forma de calor al agua, su temperatura se incrementa, hasta el punto en que el agua está cerca de la condición de ebullición, en ese momento algunas moléculas adquieren suficiente energía cinética para alcanzar la velocidad que les permita escapar del interior del líquido hacia la superficie, antes de caer de nuevo en el líquido.

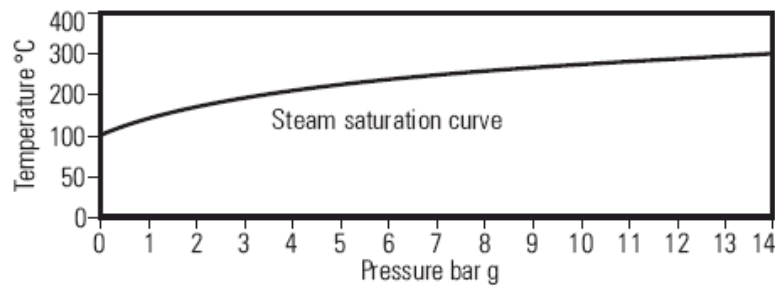
La adición de más calor causa un aumento en la excitación y un incremento en el número de moléculas con la energía suficiente para dejar el líquido. Cuando el agua es calentada hasta el punto de ebullición, las burbujas se elevan desde el interior del líquido y rompen en la superficie. Si las moléculas que escapan de la superficie del líquido son más que las que regresan, el agua se evapora libremente; en este momento, se ha alcanzado el punto de ebullición o temperatura de saturación.

Si la presión permanece constante, la adición de más calor no causa un aumento en la temperatura, pero hace que el agua pase a la forma de vapor saturado. La temperatura de ebullición del agua y la del vapor saturado son iguales si hacen parte del mismo sistema, pero, la energía por unidad de masa es mucho mayor en el vapor.

Cuando el proceso de evaporación de agua se hace a altas presiones, debe adicionarse más calor; y como consecuencia, la temperatura de saturación y la entalpía del vapor se incrementarán. La relación entre la temperatura de saturación y la presión es conocida como curva de saturación del vapor³. (Ver figura 1).

³ Steam Engineering tutorials [en línea]. Argentina: Spirax Sarco, 2007. [Consultado 12 de Agosto de 2007]. Disponible en Internet: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>.

Figura 1. Curva de saturación del vapor



Fuente: Steam Engineering tutorials [en línea]. Argentina: Spirax Sarco, 2007. [Consultado 12 de Agosto de 2007]. Disponible en Internet: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>.

5.1.1 Propiedades termodinámicas del vapor. A continuación solo se hace mención a algunas de las propiedades del vapor que serán útiles para el desarrollo de este trabajo.

✓ **Entalpía.** “La entalpía es el término usado para denotar la energía total, debida a la presión y a la temperatura de un fluido o gas, en una condición determinada o tiempo dado”⁴.

Entalpía del agua o calor sensible del agua (h_f). “Es la energía requerida para elevar la temperatura del agua de 0 °C hasta una determinada temperatura”⁵. Se puede calcular como:

$$h_f = 0.8842(\ln(P_v))^3 - 18.77(\ln(P_v))^2 + 200(\ln(P_v)) - 748.5 \quad (\text{Ecuacion 5.1})$$

Donde:

P_v : Presión absoluta de saturación del agua en [Pa].

h_f : Entalpía del agua saturada [KJ/Kg].

⁴ Ibid., Disponible en Internet: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>.

⁵ Ibid., Disponible en Internet: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>.

Entalpía de vapor saturado o calor total de vapor saturado. “Es la energía total en el vapor saturado. La suma de la entalpía del agua y la entalpía de evaporización”⁶.

$$h_g = -0.07402(\ln(P_v))^4 + 2.887(\ln(P_v))^3 - 39.58(\ln(P_v))^2 + 260(\ln(P_v)) + 1824$$

(Ecuacion 5.2)

Donde:

P_v : Presión absoluta de saturación del vapor en [Pa].

h_g : Entalpía del vapor saturado [KJ/Kg].

Entalpía de evaporización o calor latente. “Es la cantidad de calor requerida para el cambio de fase del agua líquida a vapor (o viceversa), a la temperatura de ebullición, esto implica que no hay un cambio en la temperatura de la mezcla agua-vapor y que toda la energía se usa para cambiar de estado”.⁷

$$h_{fg} = h_g - h_f \quad (\text{Ecuacion 5.3})$$

Donde:

h_{fg} : Entalpía de evaporización o calor latente [KJ/Kg].

✓ **Volumen específico.**

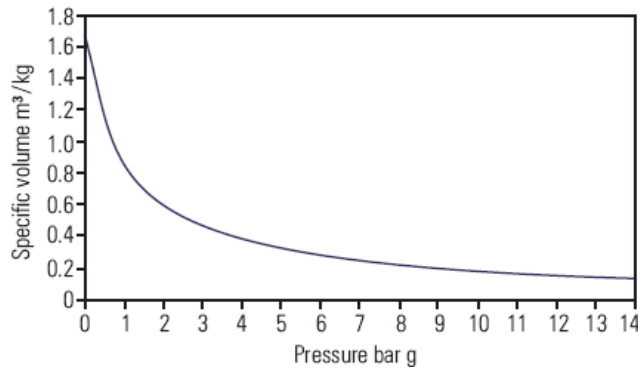
Es el volumen ocupado por una masa unitaria en una determinada condición de temperatura y presión, si la presión del vapor aumenta, la densidad también lo hace. Como el volumen específico es inversamente proporcional a la densidad, este volumen disminuye con el incremento de la presión; sin embargo, la cantidad de energía contenida en ese volumen aumenta⁸. (Ver figura 2).

⁶ Ibid., Disponible en Internet: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>.

⁷ Ibid., Disponible en Internet: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>.

⁸ Ibid., Disponible en Internet: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>.

Figura 2. Relación entre la presión del vapor y el volumen específico



Fuente: Steam Engineering tutorials [en línea]. Argentina: Spirax Sarco, 2007. [Consultado 12 de Agosto de 2007]. Disponible en Internet: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>.

El volumen específico se calcula como el inverso de la densidad, la cual se puede calcular como:

$$\rho_g = 1 * 10^{-3} ((0.005048 * P_v) + 64.26) \quad (\text{Ecuacion 5.4})$$

$$\rho_f = -0.3136(\ln(P_v))^3 + 6.792(\ln(P_v))^2 - 52.43(\ln(P_v)) + 1141 \quad (\text{Ecuacion 5.5})$$

Donde:

ρ_g : Densidad del vapor saturado seco [Kg/m³].

ρ_f : Densidad del agua saturada [Kg/m³].

Las demás propiedades del vapor saturado y el agua saturada como la viscosidad, la conductividad térmica, el calor específico, etcétera; se deben obtener de las tablas de propiedades termodinámicas para el agua saturada, a menos que, se use el método de mínimos cuadrados para ajustar los datos tabulados a una curva, en cuyo caso, se hará mención de dicha expresión.

5.1.2 Fracción de sequedad o calidad del vapor. Cuando el vapor se encuentra a la temperatura de saturación y a la presión correspondiente se le conoce como vapor saturado seco; sin embargo, es raro producir vapor saturado seco al 100% en una caldera industrial, ya que este vapor, usualmente contiene gotitas de agua, este grado de humedad se designa como título o fracción de sequedad, la cual afecta las propiedades específicas del vapor. “Por ejemplo, si el vapor tiene un título de 0.9, el 90% de su masa será vapor seco y el 10% restante será agua, lo que afecta la entalpía de evaporización en ese factor, causando una

reducción en la misma y por consiguiente, una disminución en la energía total del vapor así⁹:

$$h_{fg}^* = xh_{fg}$$

Donde:

h_{fg}^* : Calor latente en el vapor húmedo.

h_{fg} : Calor latente en el vapor saturado seco.

x : Fracción de sequedad o calida del vapor.

La entalpía total del vapor húmedo es:

$$h = h_f + h_{fg}^*$$

O en función de la fracción de sequedad como:

$$h = h_f + xh_{fg} \quad (\text{Ecuación 5.6}).$$

Para el volumen específico del vapor húmedo se tiene:

$$v = xV_g \quad (\text{Ecuación 5.7}).$$

5.1.3 Vapor flash. El término vapor flash se emplea comúnmente para describir el vapor producido en líneas abiertas de condensado o en la descarga de una trampa.

El vapor flash se produce cuando al agua a alta presión (y a temperaturas más altas que la temperatura de saturación del líquido a baja presión) se le permite caer a una presión más baja; por el contrario, si la temperatura del agua a alta presión, es más baja que la temperatura de saturación de la presión más baja, el vapor flash no se formará.

La fracción de vapor flash que se forma a partir de una determinada masa de condensado; se calcula como:

$$F_{VAPOR} = \frac{h_f @ alta \text{ presión} - h_f @ baja \text{ presión}}{h_{fg} @ baja \text{ presión}} \quad (\text{Ecuación 5.8})$$

⁹ Ibid., Disponible en Internet: <http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>.

5.2 AIRE

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno, vapor de agua y pequeñas cantidades de otros gases. El aire con cierto contenido de humedad se conoce como aire atmosférico, en contraste, el aire que no contiene vapor de agua se conoce como aire seco.

El aire atmosférico se trata como una mezcla de gases ideales cuya presión es la suma de la presión parcial del aire seco (P_a) y la presión parcial del vapor de agua en el aire ($P_{v,a}$)¹⁰.

$$P = P_a + P_{v,a} \quad (\text{Ecuacion 5.9})$$

5.2.1 Humedad específica y relativa del aire. Se conoce como humedad absoluta o específica del aire a la masa de vapor de agua presente en una masa unitaria de aire seco.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \left[\frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg Aire Seco}} \right] \quad (\text{Ecuacion 5.10})$$

La humedad relativa del aire, es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y la cantidad máxima de vapor que puede llegar a contener a determinada temperatura.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_{v,a}}{P_g} \quad (\text{Ecuacion 5.11})$$

Esta humedad depende de la temperatura, mientras que la humedad específica no lo hace.

5.2.2 Temperatura de punto de rocío. “Esta se define como la temperatura a la cual se inicia la condensación si el aire se enfría a presión constante”¹¹.

$$T_{pr} = \frac{1668}{10.092 - \log(P_{v,a})} - 228 [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Ecuacion 5.12})$$

¹⁰ ÇENGEL, Yunus A. Termodinámica. 4 ed. México: McGraw-Hill, 2003. p. 648.

¹¹ Ibíd., p. 652.

5.2.3 Temperatura de bulbo húmedo. La medición de la temperatura de bulbo húmedo se logra mediante la instalación de una mota de algodón húmeda sobre el bulbo de un termómetro y haciendo circular una corriente de aire a través de este. Una vez inicie este proceso, el aire comenzará a ganar calor debido a la pérdida del mismo, producto de la evaporación del agua en la mota; después de un tiempo, este sistema alcanzará un equilibrio térmico, es decir, que la pérdida de calor por evaporación, será igual a la ganancia de calor del aire; la temperatura del agua se estabiliza y en este momento el termómetro mostrará la temperatura de bulbo húmedo. “La temperatura de bulbo húmedo es ligeramente más alta que la temperatura de punto de rocío, excepto, cuando el aire se encuentra saturado”¹².

$$\omega_{Sat} = 0.622 \frac{P_{v,b}}{P - P_{v,b}} \quad (\text{Ecuación 5.13})$$

$$\omega = \frac{C_{Pa}(T_b - T_a) + \omega_{Sat}(h_{g,b} - h_{f,b})}{h_g - h_{f,b}} \quad (\text{Ecuación 5.14})$$

$$P_{v,b} = \frac{10^{\left(10.092 - \frac{1668}{228 + T_b}\right)}}{1000} [KPa] \quad (\text{Ecuación 5.15})$$

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega)P_g} \quad (\text{Ecuación 5.16})$$

Donde:

P : Presión total del aire.

P_a : Presión parcial del aire.

$P_{v,a}$: Presión parcial del vapor de agua en el aire.

P_g : Presión de saturación del vapor de agua en el aire. $P_g = P_{sat} @ T_a$.

T_b : Temperatura de bulbo húmedo del aire [°C].

$P_{v,b}$: Presión parcial del vapor de agua en el aire cuando $\phi = 1$. $P_{v,b} = P @ T_b$.

$h_{g,b}$: Entalpía del vapor de agua en el aire a la temperatura de bulbo húmedo.

$h_{g,b} = h_g @ P_{v,b}$.

$h_{f,b}$: Entalpía del agua a la temperatura de bulbo húmedo. $h_{f,b} = h_f @ P_{v,b}$.

h_g : Entalpía del vapor de agua en el aire a la temperatura del aire. $h_g = h_g @ P_g$.

T_a : Temperatura del aire o temperatura de bulbo seco [°C].

¹² Ibíd., p. 653.

C_{pa} : Calor específico del aire [KJ/Kg °C].

La presión de saturación P_g se obtiene de manera aproximada de la ecuación 5.12 si en lugar de la temperatura de bulbo húmedo (T_b) se usa el valor de la temperatura del aire (T_a). Si se requiere de valores de presión más exactos deben utilizarse las tablas de las propiedades termodinámicas del agua.

5.2.4 Propiedades termodinámicas del aire.

✓ **Entalpía del aire.** La entalpía del aire atmosférico es la suma de la entalpía del aire seco y del vapor de agua.

$$h = h_a + \omega h_g$$

$$h = C_{pa} T_a + \omega h_g \left[\frac{KJ}{Kg \text{ Aire Seco}} \right] \quad (\text{Ecuación 5.17})$$

✓ **Densidad del aire.**

$$\rho_a = \frac{P}{R(T_a + 273.15)} \quad (\text{Ecuación 5.18})$$

ρ_a : Densidad del aire [Kg/m³].

✓ **Viscosidad dinámica.**

$$\mu_a = (4.134 * 10^{-4}) \left[\frac{145.8 * (T_a + 273.15) \sqrt{(T_a + 273.15)}}{(T_a + 273.15) * 110.4} * (241.9 * 10^{-7}) \right] \quad (\text{Ecuacion 5.19})$$

μ_a : Viscosidad dinámica [Kg/m s].

✓ **Viscosidad cinemática.**

$$\nu_a = \frac{\mu_a}{\rho_a} \quad (\text{Ecuación 5.20})$$

ν_a : Viscosidad cinemática [m²/s].

✓ **Conductividad térmica.**

$$k_a = 1.731 * \left[\frac{6.325 * 10^{-6} \sqrt{(T_a + 273.15)}}{[1 + ((245.4 * 10^{-12} / (T_a + 273.15)) / (T_a + 273.15))]} * 241.77 \right] \quad (\text{Ecuacion 5.21})$$

k_a : Conductividad térmica del aire [W/m K].

✓ **Calor específico del aire.**

$$C_{pa} = -6.7356 * 10^{-11} T^3 + 1.6952 * 10^{-7} T^2 - 5.2238 * 10^{-6} T + 1.00515 \quad (\text{Ecuacion 5.22})$$

$$T = (1.8 * T_a) + 32 \quad (\text{Ecuacion 5.23})$$

Las ecuaciones para el cálculo de las propiedades termodinámicas del aire se tomaron del documento: Standard Practice for estimate of heat gain or loss and the surface temperatures of insulated flat, cylindrical, and spherical systems by use of computer programs (ASTM C680).

5.3 TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor se puede transferir de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación.

5.3.1 Conducción. Es la transferencia de energía entre las partículas más energéticas de un cuerpo hacia las adyacentes menos energéticas. El flujo de calor normal a la superficie es directamente proporcional al gradiente de temperatura en la dirección del flujo.

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dp} \quad (\text{Ecuacion 5.24})$$

Donde la conductividad térmica k es la constante de proporcionalidad y p es la variable espacial a través de la cual el calor esta fluyendo.

5.3.2 Convección. Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento; comprende los efectos combinados de conducción y el movimiento de fluidos.

✓ **Convección forzada.** El fluido es forzado a fluir sobre la superficie por medios externos.

✓ **Convección natural o libre.** El movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje debidas a las diferencias de densidades causadas por los gradientes de temperatura.

La rapidez de la transferencia de calor por convección es expresada por la ley de enfriamiento de Newton como:

$$\dot{Q} = h_{CONV} A (T_{SUP} - T_{\infty}) \quad (\text{Ecuacion 5.25})$$

Donde h_{CONV} es el coeficiente de transferencia de calor por convección, A es el área superficial, T_{SUP} y T_{∞} es la temperatura de la superficie y del fluido lo suficientemente alejado de la superficie respectivamente.

✓ **Coeficiente de transferencia de calor por convección sobre superficies.** En este trabajo el coeficiente de transferencia de calor por convección se denota como h acompañado del sub índice “a” si el fluido es aire, “v” si el fluido es vapor y “w” si el fluido es agua, dicha notación se aplicara para las superficies cilíndricas y planas, cada una de ellas se diferencia con los subíndices D y L respectivamente. A continuación, se lleva a cabo un análisis dimensional (aplicación del teorema PI) para caracterizar el fenómeno de la convección forzada y natural, con esto se busca establecer la dependencia de este coeficiente de convección de otras variables.

Análisis dimensional (Convección forzada). El coeficiente de convección para una superficie expuesta a una corriente de algún fluido, es una función de las propiedades termodinámicas de dicho fluido, tales como: la conductividad térmica

(k_{FLUIDO}), la densidad (ρ_{FLUIDO}), viscosidad (μ_{FLUIDO}), velocidad (V_{FLUIDO}), capacidad calorífica ($C_{P,FLUIDO}$), y la geometría de la superficie (L_{CARACT}).

$$h = f(k_{FLUIDO}, \rho_{FLUIDO}, \mu_{FLUIDO}, V_{FLUIDO}, C_{P,FLUIDO}, L_{CARACT})$$

Escrito en dimensiones de masa (M), longitud (L), tiempo (T) y temperatura (θ):

$$\frac{M}{T^3 \theta} = f\left(\frac{ML}{T^3 \theta}, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{LT}, \frac{L}{T}, L, \frac{L^2}{T^2 \theta}\right)$$

Numero de Variables = 7

Numero de Dimensiones = 4

Numeros $PI = 7 - 4 = 3$

Primer número PI:

$$\Pi_1 = k_{FLUIDO}^a \mu_{FLUIDO}^b V_{FLUIDO}^c L_{CARACT}^d h$$

$$M^0 L^0 T^0 \theta^0 = \left(\frac{ML}{T^3 \theta}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{L}{T}\right)^c (L)^d \frac{M}{T^3 \theta}$$

Una vez se resolvió el sistema de ecuaciones el valor de los exponentes es:

$$a = -1, \quad b = 0, \quad c = 0, \quad d = 1$$

$$\Pi_1 = k_{FLUIDO}^{-1} \mu_{FLUIDO}^0 V_{FLUIDO}^0 L_{CARACT}^1 h_{FL} = \frac{h L_{CARACT}}{k_{FLUIDO}} = Nu$$

Segundo número PI:

$$\Pi_2 = k_{FLUIDO}^a \mu_{FLUIDO}^b V_{FLUIDO}^c L_{CARACT}^d \rho_{FLUIDO}$$

$$M^0 L^0 T^0 \theta^0 = \left(\frac{ML}{T^3 \theta}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{L}{T}\right)^c (L)^d \frac{M}{L^3}$$

$$a = 0, \quad b = -1, \quad c = 1, \quad d = 1$$

$$\Pi_2 = k_{FLUIDO}^0 \mu_{FLUIDO}^{-1} V_{FLUIDO}^1 L_{CARACT}^1 \rho_{FLUIDO} = \frac{\rho_{FLUIDO} V_{FLUIDO} L_{CARACT}}{\mu_{FLUIDO}} = Re$$

Tercer número PI:

$$\Pi_3 = k_{FLUIDO}^a \mu_{FLUIDO}^b V_{FLUIDO}^c L_{CARACT}^d C_{P,FLUIDO}$$

$$M^0 L^0 T^0 \theta^0 = \left(\frac{ML}{T^3 \theta} \right)^a \left(\frac{M}{LT} \right)^b \left(\frac{L}{T} \right)^c (L)^d \frac{L^2}{T^2 \theta}$$

$$a = -1, \quad b = 1, \quad c = 0, \quad d = 0$$

$$\Pi_3 = k_{FLUIDO}^{-1} \mu_{FLUIDO}^1 V_{FLUIDO}^0 L_{CARACT}^0 C_{P,FLUIDO} = \frac{C_{P,FLUIDO} \mu_{FLUIDO}}{k_{FLUIDO}} = Pr$$

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3)$$

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Se concluye que el coeficiente de transferencia de calor para la convección forzada es una función de los grupos adimensionales: Nusselt, Reynolds y Prandtl.

Análisis dimensional (Convección natural). La fuerza impulsora de la convección natural, es la fuerza de empuje del fluido, la cual, depende del cambio de densidad ($\Delta\rho_{FLUIDO}$), de la gravedad (g) y de la viscosidad (μ_{FLUIDO}); además, de otras variables que influyen en la convección como la conductividad térmica (k_{FLUIDO}), la capacidad calorífica o calor específico ($C_{P, FLUIDO}$) y la configuración geométrica de la superficie o longitud característica (L_{CARACT}).

$$h = f(k_{FLUIDO}, \Delta\rho_{FLUIDO}, \mu_{FLUIDO}, g, C_{P,FLUIDO}, L_{CARACT})$$

Escrito en dimensiones de masa (M), longitud (L), tiempo (T) y temperatura (θ):

$$\frac{M}{T^3 \theta} = f\left(\frac{ML}{T^3 \theta}, \frac{M}{L^3}, \frac{M}{LT}, \frac{L}{T^2}, \frac{L^2}{T^2 \theta}, L\right)$$

$$Numero\ de\ Variables = 7$$

$$Numero\ de\ Dimensiones = 4$$

$$Numeros\ PI = 7 - 4 = 3$$

Primer número PI:

$$\Pi_1 = k_{FLUIDO}^a \Delta\rho_{FLUIDO}^b \mu_{FLUIDO}^c L_{CARACT}^d h_{FL}$$

$$M^0 L^0 T^0 \theta^0 = \left(\frac{ML}{T^3 \theta} \right)^a \left(\frac{M}{L^3} \right)^b \left(\frac{M}{LT} \right)^c (L)^d \frac{M}{T^3 \theta}$$

Una vez se resolvió el sistema de ecuaciones el valor de los exponentes es:

$$a = -1, \quad b = 0, \quad c = 0, \quad d = 1$$

$$\Pi_1 = k_{FLUIDO}^{-1} \Delta\rho_{FLUIDO}^0 \mu_{FLUIDO}^0 L_{CARACT}^1 h_{FL} = \frac{h L_{CARACT}}{k_{FLUIDO}} = Nu$$

Segundo número PI:

$$\Pi_2 = k_{FLUIDO}^a \Delta\rho_{FLUIDO}^b \mu_{FLUIDO}^c L_{CARACT}^d C_{P,FLUIDO}$$

$$M^0 L^0 T^0 \theta^0 = \left(\frac{ML}{T^3 \theta} \right)^a \left(\frac{M}{L^3} \right)^b \left(\frac{M}{LT} \right)^c (L)^d \frac{L^2}{T^2 \theta}$$

$$a = -1, \quad b = 0, \quad c = 1, \quad d = 0$$

$$\Pi_2 = k_{FLUIDO}^{-1} \Delta\rho_{FLUIDO}^0 \mu_{FLUIDO}^1 L_{CARACT}^0 C_{P,FLUIDO} = \frac{\mu_{FLUIDO} C_{P,FLUIDO}}{k_{FLUIDO}} = Pr$$

Tercer número PI:

$$\Pi_3 = k_{FLUIDO}^a \Delta\rho_{FLUIDO}^b \mu_{FLUIDO}^c L_{CARACT}^d g$$

$$M^0 L^0 T^0 \theta^0 = \left(\frac{ML}{T^3 \theta} \right)^a \left(\frac{M}{L^3} \right)^b \left(\frac{M}{LT} \right)^c (L)^d \frac{L}{T^2}$$

$$a = 0, \quad b = 2, \quad c = -2, \quad d = 3$$

$$\Pi_3 = k_{FLUIDO}^0 \Delta\rho_{FLUIDO}^2 \mu_{FLUIDO}^{-2} L_{CARACT}^3 g = \frac{\Delta\rho_{FLUIDO}^2 g L_{CARACT}^3}{\mu_{FLUIDO}^2}$$

Existe una manera de expresar el cambio de densidad en función de la temperatura y el coeficiente de expansión volumétrica:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{P=CONST} \rightarrow \Delta \rho = \rho \beta (T_{SUP} - T_{FLUIDO})$$

Reemplazando se tiene que:

$$\frac{\Pi_3}{\beta(T_t - T_a)} = \frac{\beta(T_{SUP} - T_{FLUIDO}) g L_{CARACT}^3}{v_{FLUIDO}^2} = \frac{\beta \rho_{FLUIDO}^2 (T_{SUP} - T_{FLUIDO}) g L_{CARACT}^3}{\mu_{FLUIDO}^2} = Gr$$

Entonces:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3)$$

$$Nu = f(Pr, Gr)$$

Donde:

Nu : Número de Nusselt.

$$Nu = \frac{h L_{CARACT}}{k_{FLUIDO}} \quad (Ecuación 5.26)$$

Re : Número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho_{FLUIDO} V_{FLUIDO} L_{CARACT}}{\mu_{FLUIDO}} \quad (Ecuación 5.27)$$

Pr : Número de Prandtl.

$$Pr = \frac{\mu_{FLUIDO} C_{P,FLUIDO}}{k_{FLUIDO}} \quad (Ecuación 5.28)$$

Gr : Número de Grashof.

$$Gr = \frac{\beta \rho_{FLUIDO}^2 (T_{SUP} - T_{FLUIDO}) g L_{CARACT}^3}{\mu_{FLUIDO}^2} \quad (Ecuación 5.29)$$

$$T_f = \frac{T_{FLUIDO} + T_{SUP}}{2} \quad (\text{Ecuación 5.30})$$

$$\beta = \frac{1}{T_f + 273.15} \quad (\text{Ecuación 5.31})$$

T_f : Temperatura de película [°C].

T_{SUP} : Temperatura de la superficie [°C].

T_{FLUIDO} : Temperatura del fluido involucrado en el fenómeno [°C].

g : Aceleración gravitacional (9.81 [m/s²]).

β : Coeficiente de expansión volumétrica [K⁻¹]

L_{CARACT} : Longitud característica [m].

- **Para la convección natural:**

$L_{CARACT} = \text{Diametro}$ Para un cilindro o tubería horizontal.

$L_{CARACT} = L$ Para una placa o cilindro vertical.

$L_{CARACT} = \frac{\text{Area Superficial}}{\text{Perimetro}} \quad (\text{Ecuación 5.32})$ Para una placa horizontal.

- **Para la convección forzada:**

$L_{CARACT} = L$ Para placas horizontales y verticales.

$L_{CARACT} = \text{Diametro}$ Para un cilindro o tubería horizontal.

- **Para la convección interna forzada:**

$L_{CARACT} = D_h$

D_h : Diámetro hidráulico.

$D_h = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (\text{Ecuación 5.33})$ (Para ductos rectangulares).

$D_h = D \quad (\text{Ecuación 5.34})$ (Para tubos circulares).

En los casos donde hay una combinación de convección natural y forzada, Churchill recomienda la siguiente ecuación para calcular el número de Nusselt global promedio:

$$(Nu - \delta)^j = (Nu_f - \delta)^j + (Nu_N - \delta)^j \quad (\text{Ecuación 5.35})$$

De la cual se obtiene:

$$h = \frac{k_{FLUIDO}}{L_{CARACT}} \left((Nu_f - \delta)^j + (Nu_N - \delta)^j \right)^{1/j} \quad (\text{Ecuación 5.36})$$

Donde el exponente j y la constante δ son definidos con base en la geometría y la orientación de la misma.

✓ **Correlaciones para la convección externa.**

Correlación para la convección forzada sobre superficies planas.

$$Nu_{f,L} = \frac{0.6774 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.0468 / Pr)^{2/3} \right]^{1/4}} \quad Re < 5 * 10^5 \quad (\text{Ecuación 5.37})$$

$$Nu_{f,L} = (0.037 Re^{4/5} - 871) Pr^{1/3} \quad 5 * 10^5 < Re < 10^8 \quad (\text{Ecuación 5.38})$$

Correlación para la convección natural sobre superficies planas verticales y cilindros verticales.

$$Nu_{N,L} = \left[0.825 + \frac{0.387 (Gr Pr)^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (\text{Ecuación 5.39})$$

Para calcular el coeficiente combinado de transferencia de calor por convección para superficies planas verticales se utiliza la ecuación 5.36 donde: $j = 3$ y $\delta = 0$.

Correlación para la convección natural sobre superficies planas horizontales.

- Superficie caliente hacia arriba.

$$Nu_{N,L} = 0.54(Gr Pr)^{1/4} \quad 10^4 < (Gr Pr) < 10^7 \quad (\text{Ecuacion 5.40})$$

$$Nu_{N,L} = 0.15(Gr Pr)^{1/3} \quad 10^7 < (Gr Pr) < 10^{11} \quad (\text{Ecuacion 5.41})$$

- Superficie caliente hacia abajo.

$$Nu_{N,L} = 0.27(Gr Pr)^{1/4} \quad 10^5 < (Gr Pr) < 10^{10} \quad (\text{Ecuacion 5.42})$$

Donde:

$Nu_{f,L}$: Número de Nusselt para la convección externa forzada sobre superficies planas.

$Nu_{N,L}$: Número de Nusselt para la convección externa natural sobre superficies planas.

Para calcular el coeficiente combinado de transferencia de calor por convección para superficies planas horizontales se utiliza la ecuación 5.36 donde: $j = 3.5$ y $\delta = 0$.

Correlación para la convección natural sobre superficies cilíndricas horizontales.

$$Nu_{N,D} = \left[0.6 + \frac{0.387 * (Gr Pr)^{1/6}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (\text{Ecuación 5.43})$$

Correlación para la convección forzada sobre superficies cilíndricas horizontales.

$$Nu_{f,D} = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (\text{Ecuación 5.44})$$

$Nu_{N,D}$: Número de Nusselt para la convección externa natural sobre un cilindro horizontal.

$Nu_{f,D}$: Número de Nusselt para la convección externa forzada sobre un cilindro horizontal.

Para calcular el coeficiente combinado de transferencia de calor por convección para cilindros horizontales se utiliza la ecuación 5.36 donde: $j = 4$ y $\delta = 0.3$.

✓ Correlación para la convección interna (flujo turbulento).

$$h_{INT} = \frac{k_{FLUIDO}}{D_h} * (0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3}) \quad (\text{Ecuación 5.45})$$

Donde:

$h_{FL,INT}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección interna.

Para el cálculo de los números de Reynolds, Prandtl y Grashof Las propiedades termodinámicas del fluido deben evaluarse a la temperatura de película o temperatura media (ecuación 5.30); sin embargo, cuando la convección es interna, determinar la temperatura media del fluido no es muy práctico, pues normalmente solo se dispone de un punto para las tomas de temperatura, en estos casos se calcularán dichas propiedades a la temperatura del fluido.

✓ **Radiación.** Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas. La rapidez de la transferencia de calor por radiación se obtiene a partir de la ley de Stefan Boltz-mann como:

$$\dot{Q} = h_{RAD} A (T_{SUP} - T_{ALRED}) \quad (\text{Ecuación 5.46})$$

$$h_{RAD} = \varepsilon_{EFECTIVA} \sigma \frac{\left((T_{SUP} + 273.15)^4 - (T_{ALRED} + 273.15)^4 \right)}{(T_{SUP} - T_{ALRED})} \quad (\text{Ecuacion 5.47})$$

$$\varepsilon_{EFECTIVA} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \quad (\text{Ecuacion 5.48})$$

Donde:

h_{RAD} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación [$\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$].

ε_1 : Emisividad de la superficie.

ε_2 : Emisividad de los alrededores.

$\varepsilon_{EFECTIVA}$: Emisividad efectiva.

σ : Constante de Stefan- Boltz-mann ($5.67 \cdot 10^{-8} [\text{W/m}^2 \text{ K}^4]$).

T_{SUP} : Temperatura de la superficie [$^\circ\text{C}$].

T_{ALRED} : Temperatura de los alrededores [$^\circ\text{C}$].

A : Área superficial [m^2].

En la práctica, es común encontrar en los alrededores próximos a la superficie sobre la cual, se quiere determinar la rapidez de la transferencia de calor por radiación, una gran cantidad de superficies de formas y tamaños diversos, debido a esto, determinar los factores de visión para llevar a cabo los cálculos de transferencia de calor por radiación, es muy complicado, aun más, cuando lo que se pretende es sistematizar las ecuaciones. Para efectos de este trabajo al igual que en la práctica estándar ASTM C680 (Standard Practice for estimate of heat gain or loss and the surface temperatures of insulated flat, cylindrical, and spherical systems by use of computer programs) se supone que los alrededores envuelven por completo la superficie en cuestión, y que los mismos tienen una emisividad de 0.95. La emisividad de la superficie (ε_1) es una constante que depende del material y de las condiciones de la superficie. Se anexa tabla de valores de emisividad para los materiales más comunes Anexo A.

5.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

5.4.1 Extracción de agua en la máquina de papel. Una de las funciones básicas de la MP-4 (máquina de papel 4), es la extracción de agua contenida en la hoja de papel, esta tarea se realiza en tres sectores:

✓ **Mesa de formación.** Desaguamiento utilizando las características hidrodinámicas del líquido y cajas de vacío.

✓ **Prensas Húmedas.** Desaguamiento por compresión mecánica. La sección de prensas está conformada por un rodillo pick-up aspirante, una Sym-press II, tensores y guías accionadoras de fieltro. Esta sección se divide en tres prensas:

- **Primera Prensa.** está provista de un rodillo de bombeo variable recubierto de acero inoxidable y de un rodillo aspirante revestido de caucho. La prensa ha sido concebida para trabajar a una presión lineal máxima de $70 \frac{kg}{cm}$.
- **Segunda Prensa.** incluye un rodillo aspirante y un rodillo de granito. La presión lineal máxima es de $80 \frac{kg}{cm}$.
- **Tercera Prensa.** incluye un rodillo de bombeo variable de acero inoxidable y un rodillo de granito. La presión lineal máxima es de $100 \frac{kg}{cm}$.

✓ **Sección de secado.** En esta etapa, el agua restante contenida en la hoja de papel es removida por evaporación.

5.4.2 Proceso de secado

✓ **Descripción del proceso de secado.** La hoja húmeda que sale de la sección de prensas y que contiene entre 60 y 64% de humedad (36-40% seco), es llevada a través de la sección de secado, donde el agua contenida en el papel es evaporada gracias al envolvimiento parcial sobre una serie de cilindros rotatorios calentados con vapor, a estos cilindros se les conoce como cilindros secadores (La descripción de los cilindros se hace más adelante).

Debido a la resistencia a la conducción de calor por parte del papel, se desarrolla una rampa de temperatura, desde su superficie interna hacia la externa, siendo la primera la que está en contacto con la superficie del cilindro secador, por lo tanto, la de mayor temperatura.

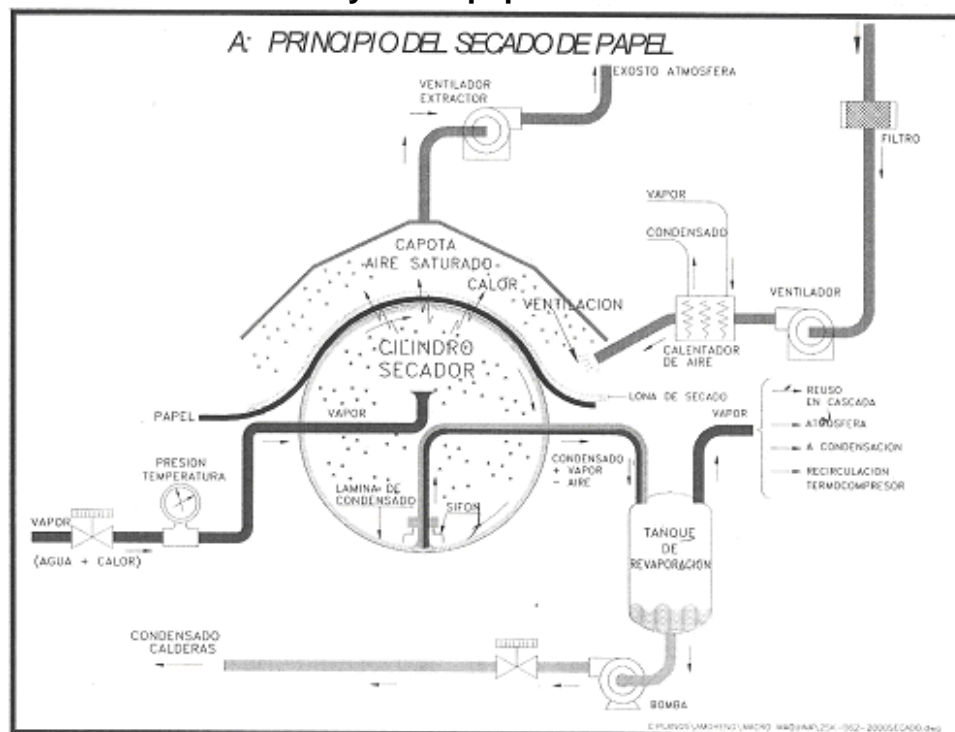
Por esta razón, la evaporación ocurre primero en las capas internas del papel, el vapor formado en estas, adquiere cierta cantidad de energía que le permite viajar a las capas adyacentes.

Como las capas externas se encuentran a temperaturas más bajas, parte de este vapor se condensa y como producto de esta se libera su calor latente, el cual, sirve para calentar las capas de papel que se encuentran a bajas temperaturas, cuando el vapor adquiere suficiente energía logra escapar del papel, si es mayor la cantidad de vapor que logra escapar que la que se condensa, entonces se dice que el agua contenida en el papel se evapora libremente, teniendo en cuenta que

dicha evaporación no solo se lleva a cabo sobre la superficie del cilindro secador, sino también, en el momento en que la hoja pasa del cilindro secador superior al cilindro secador inferior, gracias al calor latente contenido en la hoja de papel y a las corrientes de aire existentes en dichos espacios.

Luego, el agua evaporada es transportada hacia el aire circundante por la diferencia de presión entre el vapor de agua de la hoja y el aire circundante, a esta diferencia de presión, se conoce como fuerza secadora. Un sistema representativo de secado y los principales equipos que lo conforman se muestra en la figura 3.

Figura 3. Sistema de secado y sus equipos



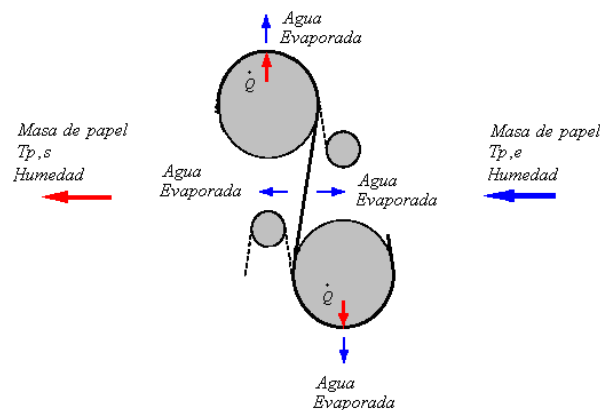
Fuente: TORRES, Jorge. Principio del secado de papel. Propal S.A. Santiago de Cali, 2007.

Como se mencionó anteriormente, la hoja de papel debe mantenerse en contacto con la superficie del cilindro secador, la cual es sostenida por medio de una tela sintética y permeable llamada Lona secadora, cuya función principal es mejorar la transmisión de calor desde el cilindro secador hacia el papel, ya que disminuye la capa de aire existente entre el papel y el secador, aumentando el coeficiente de transferencia de calor por contacto; dicha lona, tiene como desventaja el aumento de la resistencia al transporte de masa, pues el vapor, además de la resistencia impuesta por la hoja de papel, deberá pasar a través de la lona, para poder llegar al aire. La lona debe entonces tener una serie de propiedades como resistencia a

la tracción, absorbencia, permeabilidad o porosidad y una propiedad que permita que la lona tenga baja adherencia a las partículas liberadas en el proceso.

En resumen, el secado de papel puede ser representado como un proceso de dos fases, las cuales se repetirán tantas veces, como cilindros haya en la sección de secado. “En la primera fase, la hoja eleva su temperatura mientras viaja sobre el secador; en la segunda fase, el vapor de agua escapa de la hoja de papel en el espacio existente entre los cilindros superiores e inferiores”¹³, a este espacio se le conoce como bolsillo o pocket, según su traducción al inglés, debido a este la hoja de papel sufre un enfriamiento repentino y por lo tanto, debe tomar calor del siguiente secador para elevar su temperatura de nuevo. (Ver figura 4).

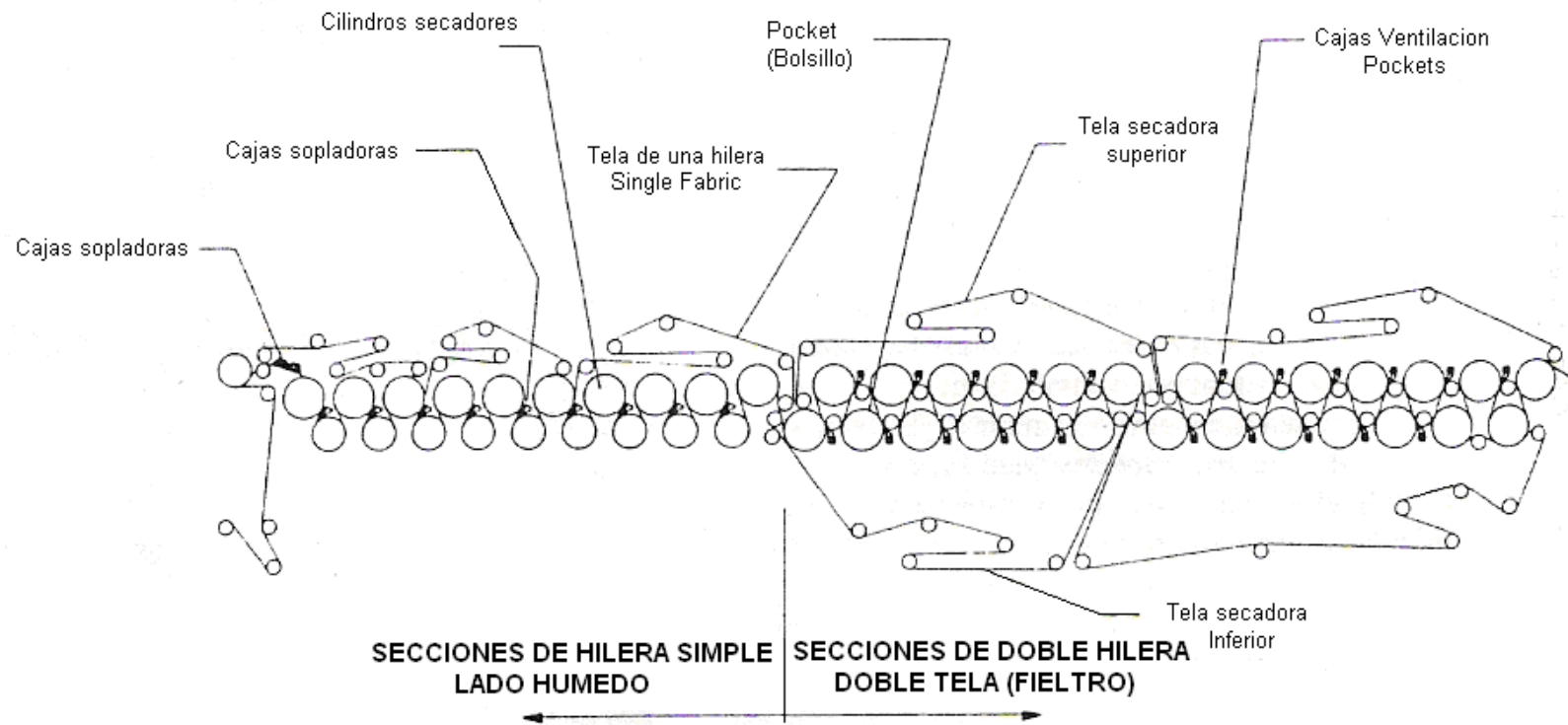
Figura 4. Evaporación en la hoja de papel.



Una representación de la configuración típica de una sección de secado y los principales equipos que la conforman y una vista del pocket o bolsillo. Se muestra en las figura 5 y 6.

¹³ SMOOK, Gary A. Handbook for pulp and paper technologists. 2 ed. Canada: Angus Wilde Publications, 1992. p. 266.

Figura 5. Configuración típica de un sistema de secado de papel



Fuente: SMOOK, Gary A. Handbook for pulp and paper technologists. 2 ed. Canada: Angus Wilde Publications, 1992. p. 264.

POCKET (BOLSILLO)

CILINDRO SECADOR

LONA

RODILLO DE LONA

ESPACIO ENTRE SECADORES

HOJA DE PAPEL

SECADOR

SECADOR

RODILLO

PAPEL

LONA

SECADOR

5.4.3 Criterios de funcionamiento. Dos indicadores son importantes para determinar el rendimiento de la sección de secado:

La rata de evaporación es afectada principalmente por la presión de vapor usada dentro de los cilindros secadores. La forma de calcular la rata de evaporación y la nomenclatura utilizada fue tomada del TIP 0404-07:

$$R_w = 60 * \frac{SBM}{nA\pi D} \quad (\text{Ecuacion 5.49})$$

M :Peso de agua evaporada por unidad de peso de papel seco.

49

$$M = \frac{L}{E} - 1 \quad (\text{Ecuación 5.50})$$

S : Velocidad de operación de la máquina [m/min].

B : Peso base de la hoja como sale de la sección de secado [Kg/m²].

A : Área de un ream estándar (1 m²)

D : Diámetro de los cilindros secadores [m].

L : Porcentaje seco de la hoja (base húmeda) dejando el último cilindro secador.

E : Porcentaje seco de la hoja (base húmeda) entrando al primer cilindro secador.

n : Número de cilindros secadores calentados con vapor en contacto con la hoja.

✓ **Economía de vapor.** esta es medida como miles de BTU's por libra de agua evaporada y en el sistema métrico como KJ por kilogramos de agua evaporada o como masa de vapor por unidad de masa de agua evaporada. Obviamente un bajo consumo de vapor es lo más deseado para tener una operación económica. Un valor de $1.3 \frac{\text{Kg Vapor}}{\text{Kg H}_2\text{O Evaporada}}$ es típico en máquinas de papel modernas, y con un sistema bien mantenido¹⁵.

5.4.4 Zonas de evaporación. La evaporación en una máquina de papel está dividida en cuatro zonas bien definidas: zona de calentamiento, zona de evaporación constante, zona de evaporación decreciente y zona límite.

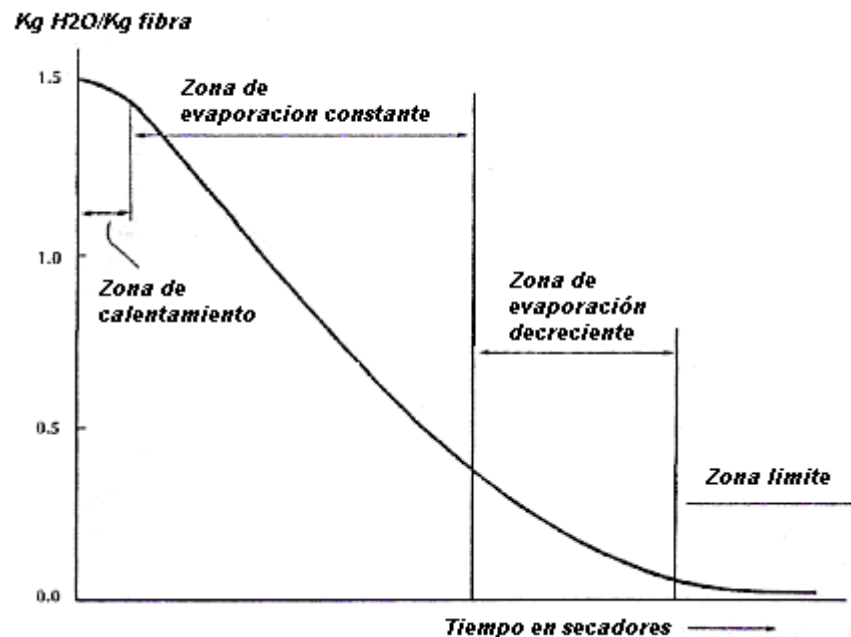
En la zona de calentamiento, la hoja recibe calor sensible proveniente de los primeros tres o cuatro cilindros secadores; después en la zona de evaporación constante, la evaporación se lleva a cabo libremente a gran velocidad; esta evaporación, se mantiene constante tanto tiempo como el agua esté presente en la superficie de las fibras o en el interior de los capilares más grandes, por consiguiente, más fáciles de drenar. El agua restante se encuentra contenida en los capilares más pequeños y como consecuencia la dificultad para secar esta cantidad de agua aumenta; entonces, la rata de evaporación empieza a decrecer (Zona de evaporación decreciente).

El punto donde empieza la zona de evaporación decreciente es conocido como razón crítica de humedad o como CMR según sus siglas en inglés (critical moisture ratio) y su valor está comprendido entre 0.4 y 0.8 KgH₂O/KgPapel; valores que se alcanzan cuando el número de cilindros secadores es de aproximadamente el 30 o 35% del total de estos.

¹⁵ Ibid., p. 265

Finalmente, en la zona límite la hoja contiene cerca del 9% de la humedad, aproximadamente 0.1 KgH₂O/KgPapel, en esta zona el agua restante en la hoja, es retenida fuertemente por fuerzas fisicoquímicas; entonces, la evaporación cae. Este valor de humedad se alcanza cuando el número de cilindros secadores es de aproximadamente el 10 o el 11% del total de secadores. Estas zonas están ilustradas en la figura 7.

Figura 7. Curva de secado



Fuente: SMOOK, Gary A. Handbook for pulp and paper technologists. 2 ed. Canada: Angus Wilde Publications, 1992. p. 265.

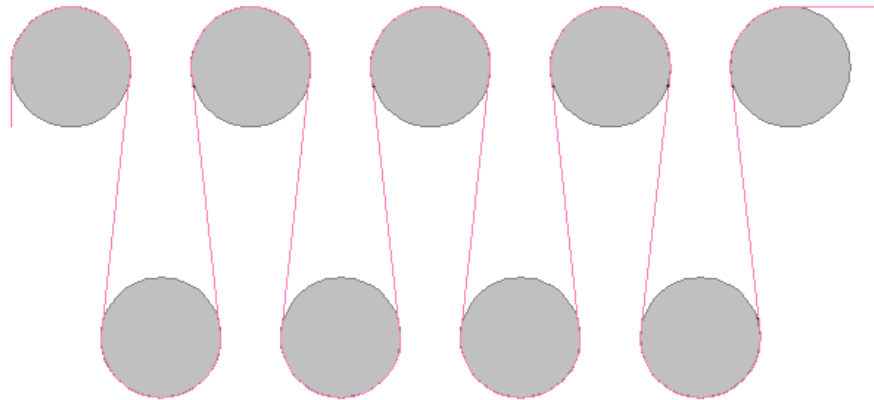
5.4.5 Configuración de los cilindros en la sección de secado. Los cilindros secadores de una sección de secado, se disponen en grupos entre los cuales existen dos tipos de configuraciones de cilindros secadores, la configuración de hilera simple también conocida como configuración de un solo fieltro (single felted) y la de doble hilera o fieltro doble (double felted).

✓ **Hilera simple.** Este tipo de configuración se usa casi siempre en los primeros dos grupos de cilindros secadores de la sección de secado, se caracteriza porque la lona es común para los secadores superiores e inferiores, esto se hace, para dar soporte a la hoja durante su recorrido, con el fin, de solucionar problemas de roturas de papel, en las secciones donde la resistencia a la tracción de la hoja de papel es baja debido a la gran cantidad de agua que

contiene. Este inconveniente ocurre principalmente en máquinas que funcionan a alta velocidad.

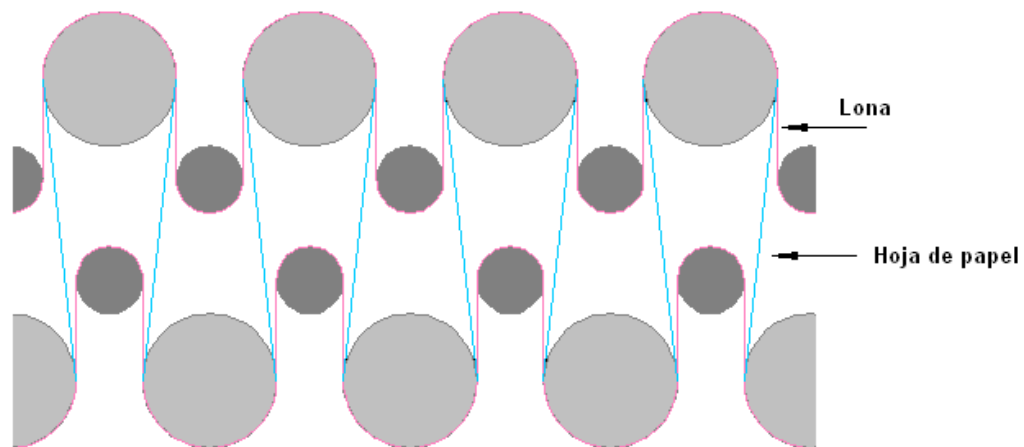
Esta configuración tiene la particularidad de que solo los secadores superiores están en contacto directo con el papel, mientras que en los cilindros inferiores, la lona se encuentra entre el secador y la hoja de papel, de modo que, en estos no ocurre un secado significativo de la hoja de papel. Por esta razón, en algunas máquinas los secadores inferiores de las secciones de hilera simple operan como secadores de lona (evaporación del agua presente en la lona), cuando hay flujo de vapor en su interior o por el contrario, suelen estar desactivados, es decir, con poco o nada de vapor en su interior. (Ver figura 8).

Figura 8. Configuración de hilera simple



✓ **Doble hilera.** Este tipo de configuración tienen como característica principal la presencia de dos lonas, una superior (Top felt) y una inferior (Bottom felt) debido a esto, ambas caras del papel están en contacto con la superficie del secador. En estos casos la hoja de papel pasa de secador a secador sin soporte. (Ver figura 9).

Figura 9. Configuración de doble hilera



5.4.6 Secciones de secado máquina de papel número cuatro (4) de PROPAL S.A. La sección de secado de la máquina de papel número cuatro, está conformada por dos secciones de secado:

✓ **Pre-secado.** Se encuentra ubicada justo después de la sección de prensas y se extiende hasta el scanner de medición de humedad, justo antes del SpeedSizer. Esta sección consta de cuatro grupos de secadores, el primer (1er) y el segundo (2do) grupo son de hilera simple, el tercer (3er), cuarto (4to) y quinto (5to) grupo son de doble hilera. (Ver figura 10).

Figura 10. Pre-secado



✓ **Post-secado.** Esta es la segunda sección de la sequería, la cual inicia después del CB Turn (equipo ubicado después del SpeedSizer, su función es soplar aire sobre el papel) y termina en el Pope Reel (eje de enrollado del papel). La post-sequería está conformada por dos grupos de cilindros secadores, el quinto (5to) A grupo es de hilera simple y el sexto (6to) es doble hilera. (Ver figura 11).

Figura 11. Post-secado



Cada una de estas secciones está encerrada en una campana. La descripción de la misma se hará más adelante.

5.4.7 Elementos que componen las secciones de secado de una máquina de papel.

✓ **Duo-Stabilizer (cajas estabilizadoras).**

Se ubican por encima del secador inferior o secador de lona y entre los dos secadores superiores.

El duo-stabilizer y el secador de lona, guían la hoja de papel que se encuentra en contacto con la lona, evitando que se produzcan pliegues en el momento en que esta pasa de secador a secador; esto se logra, mediante la aplicación de un vacío en el lado del paño que no entra en contacto con el papel y el secador inferior, garantizando un guiado óptimo de la hoja en las secciones de hilera simple. (Ver Figura 12).

El Duo-Stabilizer tiene las siguientes funciones:

Reducción de la tensión por desprendimiento prematuro de la hoja de papel del secador.

Disminución de las fuerzas de tracción que actúan sobre la hoja de papel, gracias a un vacío en la zona de descenso de la hoja.

Estabilización de la hoja de papel en la lona durante el paso entre secadores.¹⁶

Figura 12. Duo-Stabilizer



✓ **S-Stabilizer.**

En los grupos de secado de hilera única, la hoja de papel debe ser conducida apoyada, sobre la tela secadora (lona) durante el máximo tiempo posible, para impedir la flotación de la hoja y el apareamiento de arrugas.

El S-Stabilizer, tiene la función de conducir la hoja de papel totalmente asentada a medida que pasa entre los secadores, evitando la aparición de pliegues; de esta forma, la hoja es conducida de manera estable, permitiendo que la máquina opere a mayor velocidad. Para asegurar el contacto perfecto de la hoja de papel sobre la tela secadora, es necesario que exista una depresión en el lado de la tela secadora que no está en contacto con el papel. La presión diferencial, debe ser ajustada de manera que la hoja de papel quede asentada sobre la tela secadora durante todo el trayecto de la misma.

¹⁶ Manual Duo-Stabilizer. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda., 2007. p.1-10.

El S-Stabilizer está ubicado sobre el rodillo guía de la tela secadora, justo después del cilindro secador numero 17; es muy similar en aspecto aunque mas pequeño al Duo-Stabilizer¹⁷.

✓ **Cajas Sopladoras (Blow box).** Están ubicadas en la sección de pre-secado en el primer y segundo grupo de secado (Hilera simple), su función, aunque no bien comprendida, consiste básicamente en soplar aire caliente sobre la lona; de esta manera, se consigue mejorar el perfil de humedad de la hoja de papel. (Ver Figura 13)

Figura 13. Blow Box



✓ **Tubos sopladores.** Son una serie de tubos, que tienen una hilera de perforaciones sobre su longitud; están ubicados en la parte inferior de los grupos uno (1) y dos (2) de secadores, mientras que los ubicados en la parte superior, se encuentran por encima de la lona del grupo uno (1) de secadores. Su función consiste en soplar aire caliente de abajo hacia arriba, con el fin de absorber el vapor de agua, ayudar a mantener un punto de presión nula en el interior de la campana y servir como secadores de fieltro en la parte superior.

✓ **Cajas de ventilación pockets.** La función de estas cajas consiste en soplar aire caliente a los bolsillos (pockets), con los objetivos de absorber el vapor de agua liberado en el bolsillo, evitar descensos elevados de temperatura en la hoja y crear una atmósfera propicia para el transporte de masa.

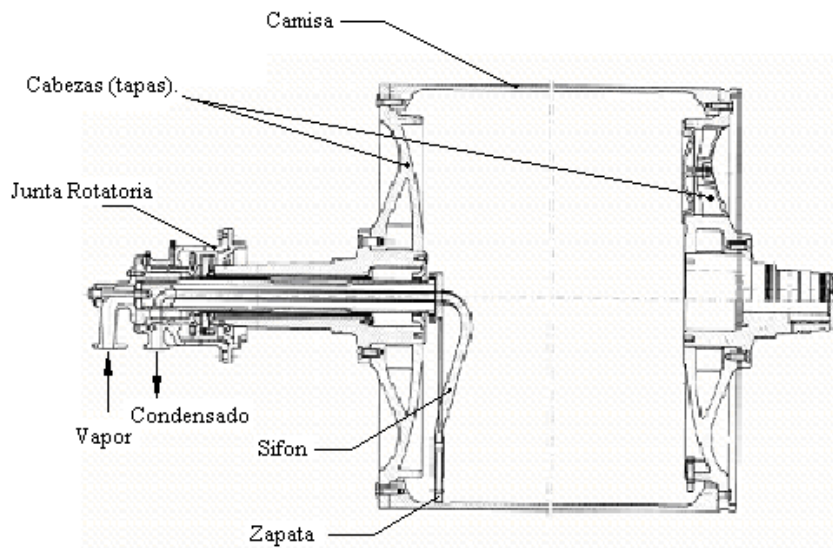
¹⁷ Manual S-Stabilizer. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda., 2007. p.1-10.

✓ **Cilindros secadores.** Un cilindro secador es un recipiente fabricado para soportar presiones de vapor internas. La camisa del secador y las tapas (secciones frontales) son hechas de hierro fundido; estas tapas se equipan con una ranura para el funcionamiento de las manilas o reatas, que guían la hoja en el proceso de enhebrado; y un agujero para el acceso de un hombre, cuando se requieran hacer mantenimiento en el interior de estos.

La alimentación de vapor y la remoción de condensado se hacen por medio de una junta rotatoria instalada sobre el eje del cilindro en uno de sus extremos. Esta junta rotatoria, tiene un montaje de manga o buje aislador para evitar el sobrecalentamiento de los cojinetes. (Ver Figura 14).

Se puede decir, que un cilindro secador funciona como un intercambiador de calor con dos objetivos, el primero, evaporar el agua contenida en el papel en la superficie externa, mediante la transferencia de energía suministrada por el vapor y condensar el vapor en su interior. La temperatura a la cual el vapor condensa y la cantidad de calor latente, dependen de la presión de vapor.

Figura 14. Cilindro secador

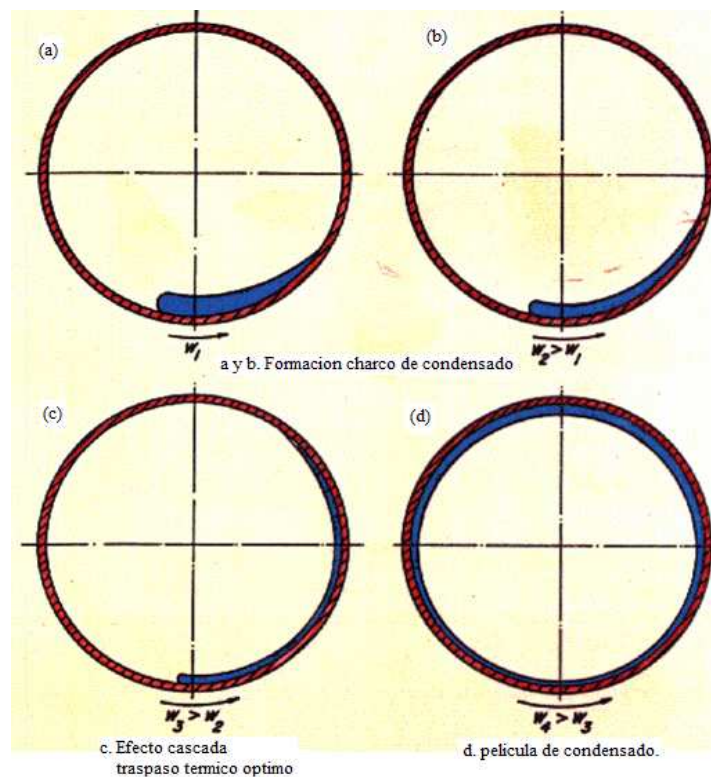


Debido a que el vapor cede su calor latente, se condensa; esto combinado con la velocidad del cilindro afecta la transferencia de calor.

- Cuando las velocidades de operación de los secadores son bajas, se forman charcos de condensado en el fondo del secador. Ver figuras 15 (a) y (b).

- Si la velocidad del secador aumenta, una combinación de la fuerza centrífuga y la gravedad crea un efecto de cascada en el condensado. El traspaso térmico es óptimo. Ver figura 15 (c).
- A altas velocidades, se crea una capa de condensado al borde del cilindro; esta cubre toda la superficie interna de la camisa del secador reduciendo la transferencia de calor del secador. Ver figura 15 (d).

Figura 15. Comportamiento de la película de condensado



Fuente: Vapor y condensado [CD-ROM]. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda, 2007.

Este condensado debe ser removido del interior del cilindro, para:

- Conservar la rata de secado.
- Mantener una temperatura uniforme en la superficie del secador.
- Evitar posibles daños por exceso de carga en el cilindro, debido a las grandes masas de agua en su interior.

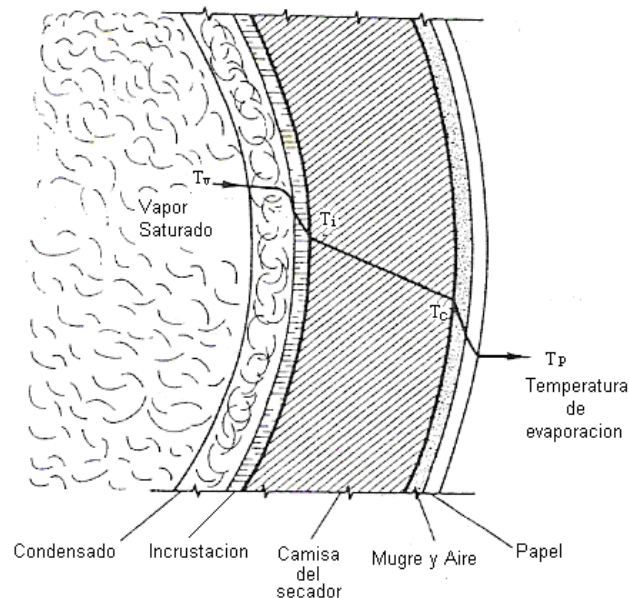
- Mantener una alta velocidad de transferencia de energía.

La velocidad a la cual el calor es transferido a la hoja, es afectada por muchas variables, una de las más importantes es la diferencia de temperatura entre el vapor y el papel. Siendo la temperatura del vapor, una función de la presión de alimentación del mismo. Una alta presión de vapor causa:

- Altas temperaturas de vapor.
- Temperaturas superficiales altas.
- Rata Alta de transferencia de calor.
- Ratas altas de evaporación.
- Incremento de la rata de producción.
- Disminución del calor latente o entalpia de evaporización.
- Mayor consumo de vapor.

El flujo de calor, desde el interior hacia la superficie del cilindro, encuentra en su recorrido algunas barreras, siendo la película de condensado la de mayor importancia debido a la alta resistencia que presenta al flujo de calor, producto de la baja conductividad térmica del condensado; la cual, es noventa veces más baja que la de la camisa del secador; es por esto, que la película de condensado juega un papel muy importante en el rendimiento térmico del sistema. (Ver figura 16).

Figura 16. Resistencias térmicas del secador



Fuente: SMOOK, Gary A. Handbook for pulp and paper technologists. Canada: Angus Wilde Publications, 1992. p. 266.

- **Características generales de los cilindros secadores de Propal S.A.**

- Cilindros (1-5):

Espesor camisa: 26.5 mm.
 Longitud efectiva (L): 6500 mm.
 Diámetro del secador (D): 1500 mm.
 Presión de diseño: 5 bar.
 Material camisa: Fundición FT30D.

- Cilindros (6-61)

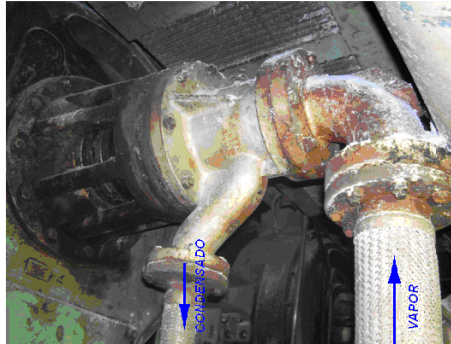
Espesor camisa: 28 mm.
 Longitud efectiva (L): 6500 mm.
 Diámetro del secador (D): 1500 mm.
 Presión de diseño: 5 bar.
 Material camisa: Fundición FT30D.

✓ **Junta rotatoria.** Una junta rotatoria es un elemento fabricado en hierro fundido nodular. Este dispositivo tiene la función de conectar el tubo de

alimentación de vapor y el tubo de drenaje de condensado al cilindro secador, las juntas utilizadas en la MP-4 (máquina de papel 4) son juntas tipo PT.

La junta PT usa un pistón con muelle, el cual, aplica una presión constante sobre un anillo que sirve de sello, manteniéndolo asegurado al asiento de un plato, el que se conoce como plato de desgaste y está unido al secador por medio de una brida, de esta manera las partes estáticas quedan unidas a las partes en rotación. (Ver figura 17).

Figura 17. Junta rotatoria



Uniones rotativas UR-9800 – cilindros 1, 3, 5, 7, 9, 42 hasta 47 y 49 hasta 51.

Uniones rotativas UR-9750 – cilindros 2, 4, 6, 8, 10 hasta 41 y 52 hasta 61.

✓ **Sifones.** Este elemento tiene como objetivo recoger el condensado y transportarlo hacia fuera del cilindro secador.

Existen dos tipos de sifones empleados actualmente, el rotativo y el estacionario. Ambos sifones operan bajo el mismo principio; el condensado es recogido por una zapata (tolva), pasa a través de la tubería vertical del sifón y es llevado fuera del cilindro por medio de la tubería horizontal del mismo. Para el drenaje del condensado se requiere que la distancia entre la zapata del sifón y la camisa del cilindro secador sea muy pequeña para controlar el espesor de la película de condensado, además de un diferencial de presión entre la entrada del secador y la tubería de condensado fuera del mismo, (esta diferencia debe ser de al menos unas 2 psi); esto quiere decir, que la presión en la línea de condensado debe estar muy por debajo de la presión en la tubería de alimentación de vapor.

Este diferencial en operación, debe exceder el requerido para garantizar que el flujo de condensado abandonará el cilindro, esto se logra a expensas de que parte del vapor que entra al secador fluye hacia fuera del cilindro secador junto con el condensado, este vapor, es conocido como vapor de arrastre. Sin la presencia de

este vapor, se formaría una columna de condensado en el interior del sifón, como consecuencia habrá que vencer una presión adicional impuesta por la misma; por lo tanto, el vapor de arrastre evita la formación de la columna de condensado, pues el flujo en el interior del sifón se convierte en una mezcla de bajo peso específico.

La diferencia principal entre los dos tipos de sifones, esta en la fijación de los mismos en los cilindros secadores. El sifón rotativo es fijado a la camisa del cilindro por un sistema de piernas; mientras que el sifón estacionario es fijado a la carcasa de la junta rotatoria. (Ver figura 18).

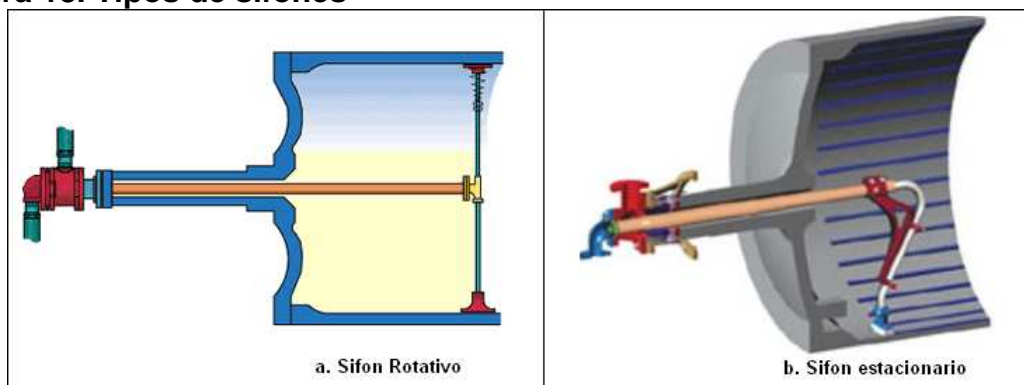
A continuación se adjunta un cuadro comparativo con las principales características de estos dos tipos de sifones. (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Comparación entre el sifón estacionario y el rotativo

	Estacionario	Rotativo
Diferencial de presión.	Menor.	Mayor
Ajuste de la zapata.	Poco preciso.	Preciso.
Presión de Vapor línea principal	Menor	Mayor.
Cuidados operacionales.	Menor	Mayor.
Dificultad de obtener cascada.	Menor	Mayor.
Cantidad de vapor de arrastre.	Menor	Mayor.
Marcación de la posición del sifón.	Si.	No.
Control de la película.	Inestable.	Estable.
Drenaje cuando lleno.	Simple.	Difícil.

Fuente: Vapor y condensado [CD-ROM]. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda, 2007.

Figura 18. Tipos de sifones



Fuente: Best practices in paper dryers operations [en línea]. Westford, Massachusetts: Kadant Johnson, 2007. [Consultado 02 de Julio de 2007]. Disponible en Internet: <http://www.kadantjohnson.com>.

En Propal S.A. los sifones que se encuentran instalados en los cilindros secadores, son estacionarios tipo cantilever.

Tubo de remoción de condensado fabricado en acero inoxidable.

Tubo horizontal cantilever soporte del sifón, fabricado de tubo mecánico sin costura de acero al carbono pared gruesa.

Zapata de succión de acero inoxidable con diseño hidrodinámico. La distancia entre la zapata del sifón y la camisa debe estar dentro del rango 1-2mm.

Este tipo de sifón opera con bajo diferencial de presión, a altas velocidades, emplea la energía cinética de la película de condensado para su drenaje.

Calibración de los sifones: 1.5 mm.

Sifones estacionarios – cilindros 1, 3, 5, 7, 9, 42 hasta 47 y 49 – DN 1 ¼”.

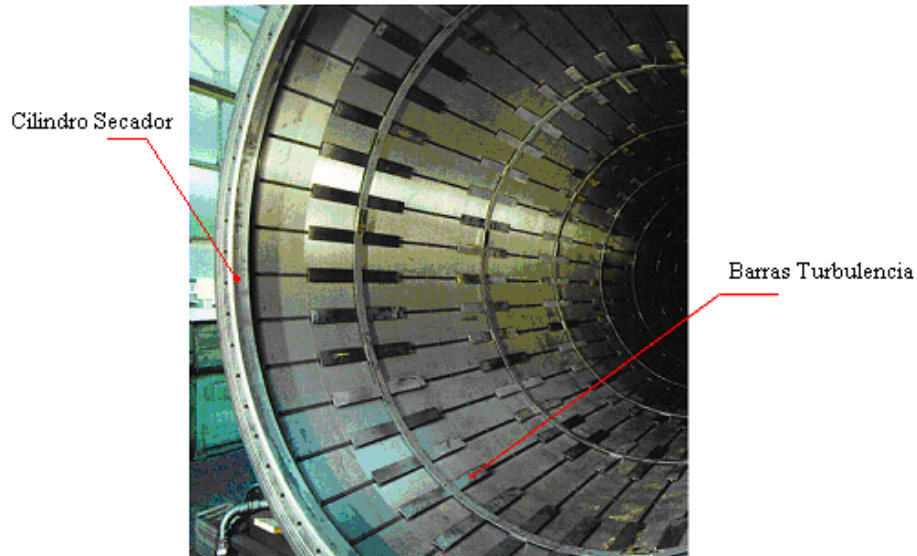
Sifones estacionarios – cilindros 2, 4, 6, 8, 10 hasta 47 - DN 1”.

Sifones estacionarios – cilindros 49 hasta 51 – DN 1 ¼”.

Sifones estacionarios – cilindros 53 hasta 61 – DN 1”.

✓ **Barras de turbulencia (Turbuladores).** Las barras de turbulencia también conocidas como Spoiler Bars o Termo Anillos, son estructuras en forma de jaula que se instalan alrededor del diámetro interno del cilindro y actúan como obstáculos en el movimiento que la película de condensado realiza; estas barras, rompen la película de condensado generando cierta agitación caótica en la película. Esta turbulencia permite aumentar considerablemente el coeficiente convectivo de transferencia de calor del condensado; y por lo tanto, un incremento en la transferencia de calor hacia la hoja de papel; además, permite mantener un perfil de temperatura uniforme sobre la superficie del secador. (Ver figura 19).

Figura 19. Barras de turbulencia



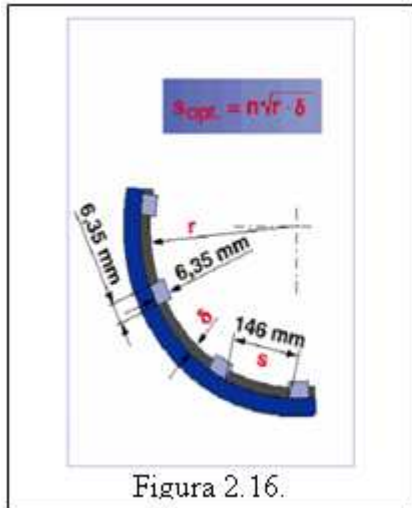
Fuente: Vapor y condensado [CD-ROM]. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda, 2007.

Las barras de turbulencia pueden ser una gran contribución para mejorar la eficiencia de secado y la calidad del papel.

Hay que tener en cuenta que las barras de turbulencia son inútiles cuando la máquina opera a velocidades bajas, o sea, cuando la película de condensado aun presenta turbulencia (efecto cascada). Bajo estas condiciones, se debe ajustar la separación entre el sifón y el cilindro en un valor pequeño para mantener bajos niveles de condensado, permitiendo ratas de transferencia de calor elevadas sin el gasto adicional de dinero en estos elementos.

La eficacia de los turbuladores es determinada por una interrelación entre la velocidad del secador y la carga de condensado; otra variable que juega un papel importante dentro de la efectividad de los turbuladores es la separación óptima entre barras, la cual, se puede calcular según una expresión que depende del radio interno del cilindro secador, su velocidad y el espesor de la película de condensado. (Ver figura 20).

Figura 20. Distancia óptima entre barras



Donde :

S_{opt} : Separacion optima entre barras.

n : Velocidad del secador.

r : Radio int erno del sec ador.

δ : espesor de la pelicula .

Fuente: Vapor y condensado [CD-ROM]. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda, 2007.

- **Instalación de las barras de turbulencia en la MP-4**

Barras de turbulencia 1er grupo de secadores cilindros (7 y 9).

Barras de turbulencia 2do grupo de secadores cilindros (11, 13, 15 y 17).

Barras de turbulencia 3er grupo de secadores cilindros (todos).

Barras de turbulencia 4to grupo de secadores cilindros (todos).

Barras de turbulencia 5to grupo de secadores cilindros (42-47).

Barras de turbulencia 5to A grupo de secadores cilindros (51).

Barras de turbulencia 6to grupo de secadores inferior y superior cilindros (todos).

✓ **Lonas (Fieltrros).** Como se observó anteriormente una de las barreras aislantes de la transferencia de calor, es el manto de aire que se encuentra entre la superficie del cilindro secador y el papel; esta capa de aire es reducida mediante el uso de lonas o fieltros secadores, las cuales, con la tensión adecuada mantendrán la hoja firme sobre la superficie del secador, disminuyendo la película de aire. La tensión de la lona es una función de la velocidad de la máquina y varía de acuerdo al diámetro del cilindro. Las tensiones recomendadas se encuentran en el TIP 0404-04 (TAPPI).

✓ **Doctors.** Otras de las barreras aislantes a la transferencia de energía en forma de calor es la suciedad que se encuentra sobre la superficie del cilindro y para eliminarla es necesaria la instalación de doctors, Los cuales son elementos que portan cuchillas, las que raspan la superficie del secador manteniéndola limpia.

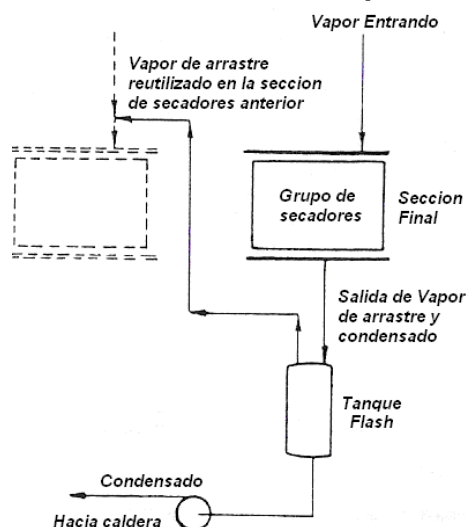
5.4.8 Sistema de vapor y condensado. Básicamente existen dos tipos de sistemas de vapor, el sistema cascada y el termocompresor.

✓ **Sistema cascada.** Tiene como característica principal el hecho de que los grupos de cilindros que conforman la sección de secado operan a presiones diferentes, de esta manera, el grupo que opera a mayor presión descarga en un separador de condensado o tanque flash. El vapor flash obtenido en dicho separador es reutilizado en el grupo de secadores inmediatamente anterior, y por tanto de presión inferior; este proceso se repite, hasta el grupo que trabaja con la menor presión del sistema (primer grupo de la sección de secado). (Ver figura 21).

Este tipo de sistema tiene la desventaja de que genera una interdependencia entre los grupos de vapor, pues la presión de operación de los grupos depende del diferencial impuesto para el drenado de condensado; o sea, la presión máxima del grupo anterior, es la presión del grupo posterior menos el diferencial para drenado de este grupo.

Otra de las desventajas, es la pérdida de la energía contenida en el vapor de arrastre generado en el separador del grupo de menor presión, la cual no es aprovechada en el proceso de secado ni reutilizada y por consiguiente, este vapor debe ser llevado a un condensador donde el calor latente de este será utilizado para el precalentamiento de cualquier otra sustancia. Cabe anotar que la presión del grupo que opera a la presión más alta puede variar independientemente.

Figura 21. Sistema cascada. Utilización del vapor de arrastre

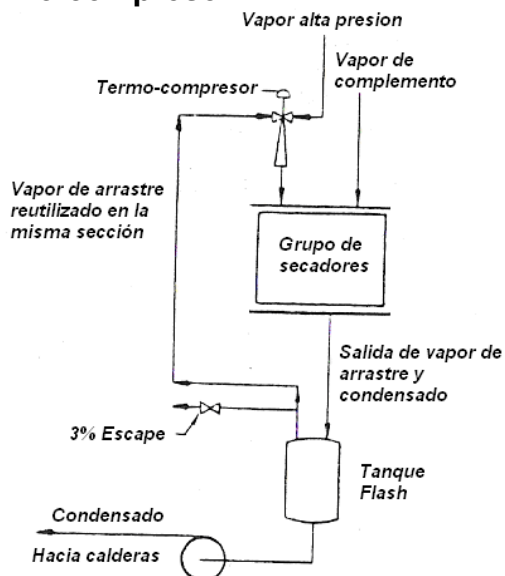


Fuente: SMOOK, Gary A. Handbook for pulp and paper technologists. 2 ed. Canadá: Angus Wilde Publications, 1992. p. 268.

✓ **Sistema termo-compresor.** (Ver figura 22). A través de este se busca, que la baja presión del vapor de arrastre sea elevada mediante el mezclado de este con el vapor vivo de alta presión, proveniente del cabezal principal. En este sistema el vapor de arrastre obtenido en el separador, es reutilizado en el mismo grupo por medio del termocompresor. El termocompresor es una boquilla como la que se muestra en la figura 23.

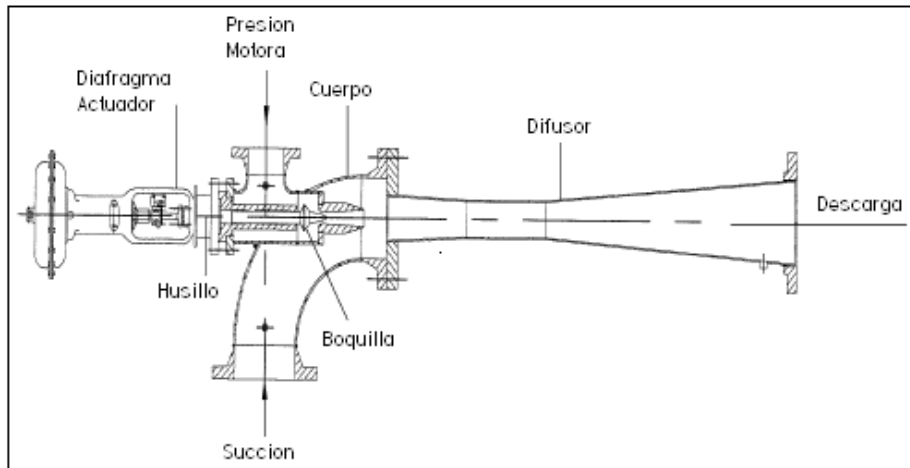
Con el sistema termocompresor, los grupos de cilindros pueden operar con cualquier presión dentro de los límites de proyecto, sin que haya la interdependencia del diferencial para drenado entre los grupos.

Figura 22. Sistema termo-compresor



Fuente: SMOOK, Gary A. Handbook for pulp and paper technologists. 2 ed. Canadá: Angus Wilde Publications, 1992. p. 269.

Figura 23. Boquilla Termo-compresor



Fuente: Manual STA7700034. Operation and Maintenance Guidelines for Air, Steam, & Condensate Systems. Finland: METSO PAPER, 2002. p.38.

En la Tabla 2 se muestra las principales diferencias entre estos dos sistemas

Tabla 2. Cuadro comparativo sistema cascada vs. Termocompresor

Sistema Cascada	Sistema Termocompresor
Requiere solamente una línea de vapor.	Requiere dos líneas generales de vapor, una media y otra de baja.
Las presiones de vapor en los grupos son dependientes.	Las presiones de vapor en los grupos son independientes.
La presión media de vapor en la máquina es menor, y por lo tanto, la evaporación específica alcanzada es menor.	La presión media de vapor en la máquina es mayor, y por lo tanto, la evaporación específica alcanzada es mayor.
La versatilidad de los productos de la máquina es perjudicada.	La versatilidad de los productos de la máquina es permisible.
Puede generar problemas en el diferencial de presión adecuado para el drenado.	La independencia entre grupos permite control individual de los mismos.
No operan muy bien con cualquier tipo de papel.	Operan muy bien con cualquier tipo de papel.

Fuente: Vapor y condensado [CD-ROM]. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda, 2007.

5.4.9 Proceso de secado en la MP-4 (Máquina de papel 4) según el flujo de vapor y condensado. El sistema de vapor y condensado de la máquina de papel 4 es tipo cascada y utiliza vapor de baja presión. El vapor de baja presión es suministrado a 4 barg y a una temperatura de 152 °C por el cabezal principal.

Los grupos de vapor que conforman la sección de secado se clasifican como se muestra a continuación:

Pre-secado:

- ✓ 1er grupo, con 5 cilindros secadores (cilindros 1, 3, 5, 7 y 9).
- ✓ 2do grupo, con 12 cilindros secadores (cilindros inferiores 2 hasta 16 y cilindros superiores 11, 13, 15 y 17).
- ✓ 3er grupo, con 12 cilindros secadores (cilindros 18 hasta 29).
- ✓ 4to grupo, con 12 cilindros secadores (cilindros 30 hasta 41).
- ✓ 5to grupo, con 5 cilindros secadores (cilindros 42 hasta 47).

Post-secado:

- ✓ 5to A grupo, con 3 cilindros secadores (49, 50 y 51).
- ✓ 6to grupo superiores, con 5 cilindros secadores (53, 55, hasta 61).
- ✓ 6to grupo inferior, con 5 cilindros secadores (52, 54, hasta 60).

Cada uno de estos grupos a los que se hizo mención cuentan con sus respectivos tanques separadores o tanques flash; por lo tanto, en la descripción que se hará a continuación se nombrarán dichos separadores sin hacer distinción del grupo al que pertenecen.

El proceso que se describirá a continuación, es un resumen general que pretende dar claridad acerca del manejo y uso del vapor y el condensado en la máquina de papel 4; por lo tanto, se omitirá la descripción de ciertos equipos involucrados en el proceso, ya que se considera no será útil para efectos de este trabajo. Se inicia dicha descripción de los grupos de la sección de pre-secado, comenzando con aquellos que operan con la mayor presión del sistema, estos grupos tienen la característica de que su presión es autónoma y puede variar independientemente.

El cuarto (4) y quinto (5) grupo de secadores son alimentados con vapor vivo proveniente del cabezal principal, la mezcla de condensado y vapor que sale de dichos grupos es enviada a sus respectivos separadores, donde el vapor de arrastre obtenido en estos, es reutilizado en el tercer (3) grupo de secadores; a su vez, este grupo toma del cabezal principal cierta cantidad de vapor vivo como complemento. El vapor de arrastre obtenido en el separador de dicho grupo es enviado al segundo (2) grupo de secadores, el cual recibe del cabezal principal el vapor de complemento; de la misma manera, el vapor de arrastre obtenido en el separador es enviado al primer (1) grupo de secadores, el cual también recibe vapor vivo proveniente del cabezal principal, el vapor de arrastre proveniente del separador de este grupo, es enviado a un condensador.

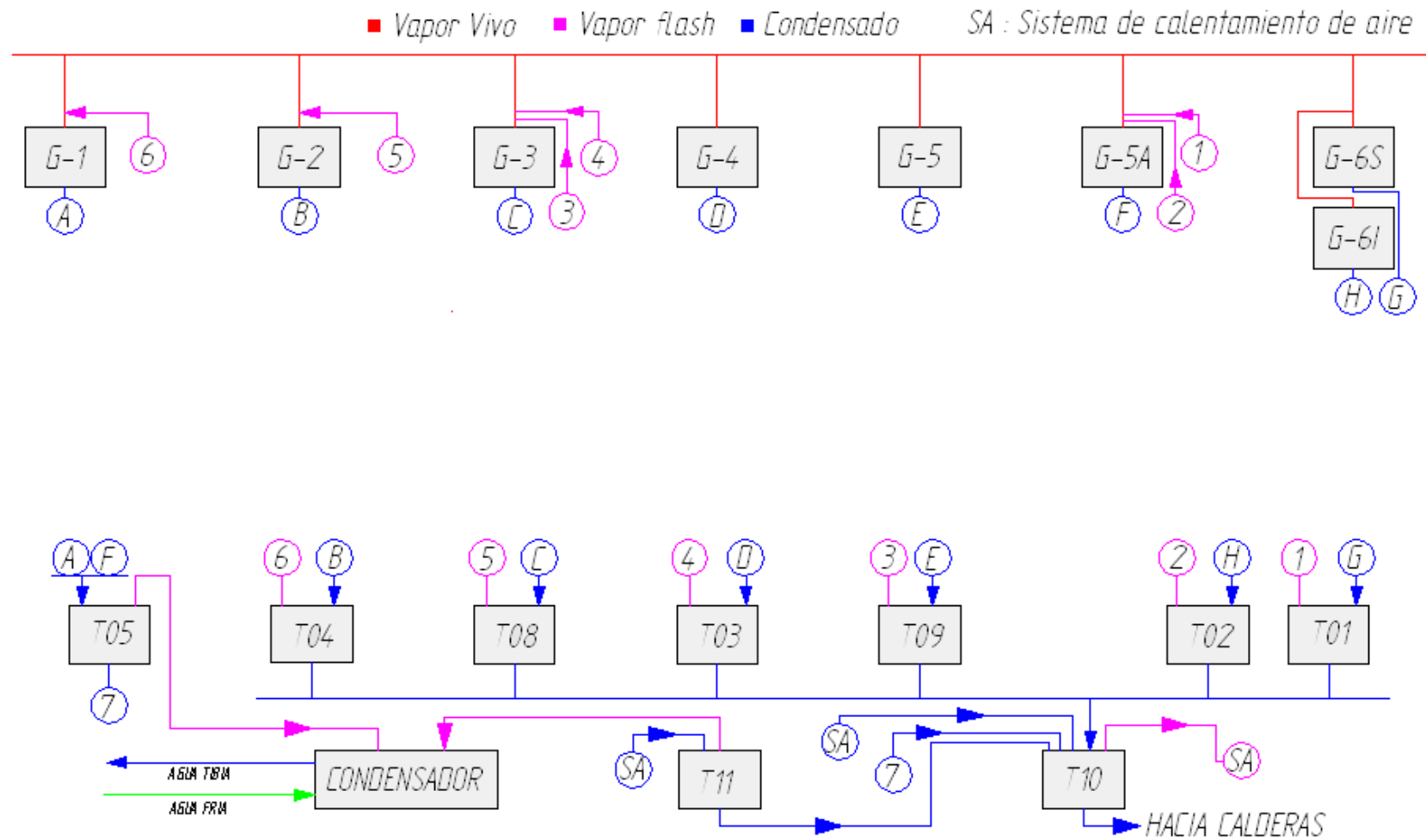
En la sección de post – secado el sexto (6) grupo de secadores superiores e inferiores se alimentan con vapor vivo originario del cabezal principal, el vapor de

arrastre obtenido en sus respectivos separadores es reutilizado en el quinto A (5A) grupo de secadores, el cual, drena en el separador del primer (1) grupo de secadores.

El condensado obtenido en los separadores del segundo (2), tercero (3), cuarto (4), quinto (5) y sexto (6) grupo inferior y superior, es enviado a un tanque flash, el vapor flash producido en dicho tanque es enviado a los intercambiadores de calor para el precalentamiento del aire que será insuflado en la campana. El condensado contenido en dicho tanque es bombeado hasta la caldera.

Un resumen del sistema de vapor y condensado de la MP-4 se muestra en la figura 24.

Figura 24. Sistema representativo del sistema de vapor y condensado de la MP-4



5.4.10 Sistema de ventilación.

✓ **Ventilación de la campana.** La campana o Hood, según su traducción en inglés, es el conjunto de paneles dispuestos sobre una estructura metálica que tiene como objetivo, encerrar las secciones de secado de una máquina de papel.

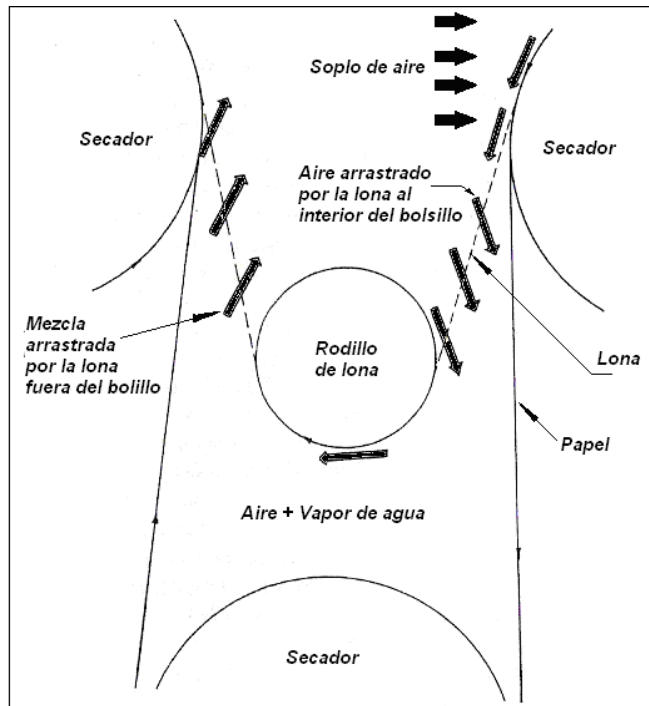
La función principal del aire en el proceso de secado, es absorber el vapor proveniente de la evaporación del agua, y transportarlo fuera de la campana (Hood) evitando la posible condensación del mismo. La cantidad de aire que está siendo extraída de la campana, debe ser igual a la masa de aire insuflada en la misma, para mantener un equilibrio entre la presión en el interior de la campana y la presión atmosférica; a esta condición se le conoce como punto de presión nula.

En la práctica, la cantidad de aire de extracción suele ser nueve veces la cantidad de agua evaporada, mientras que el aire de repuesto el 80 % del volumen de aire extraído por los ventiladores; esto depende de entre otros muchos factores, de las condiciones ambientales y del tipo de campana que se tenga; el 20% restante proviene de los alrededores (aire que se introduce por aperturas).

Todo el aire que se insufla en la campana de la máquina, debe introducirse en todas las cavidades de la sección de secado, con el objetivo de mejorar las condiciones para la evaporación y transporte de masa en las áreas de operación. A este proceso se le conoce como ventilación de bolsillo.

Este proceso de ventilación, se lleva a cabo mediante el soplo de aire caliente a alta velocidad sobre la lona permeable (fieltro secador), con el objetivo, de arrastrar el aire introduciéndolo y transportándolo hacia fuera del pocket una vez haya absorbido el vapor de agua producto del secado del papel. (Ver figura 25).

Figura 25. Proceso de ventilación de bolsillo



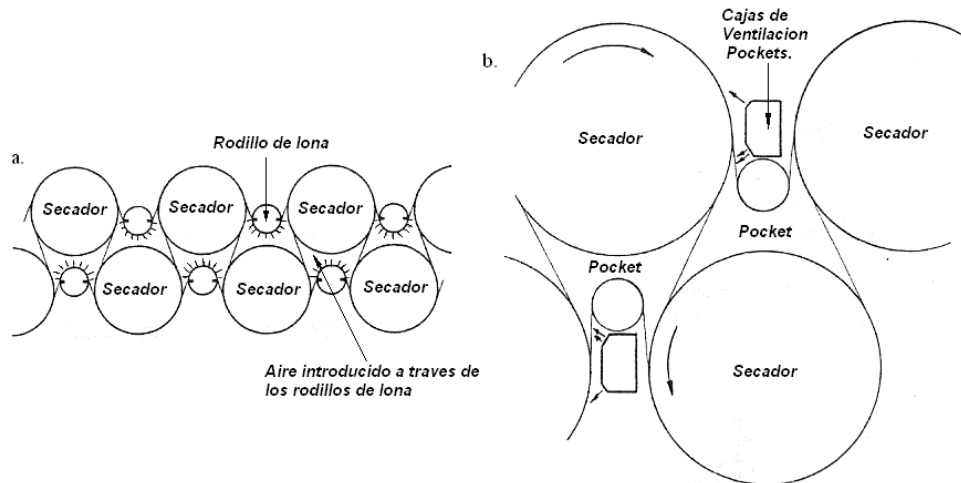
Fuente: SMOOK, Gary A. Handbook for pulp and paper technologists. 2 ed. Canadá: Agnus Wilde Publications, 1992. p. 269.

“La cantidad de aire introducido al Pocket es entonces una función que depende de la permeabilidad de la lona y de la velocidad de la máquina de papel”¹⁸.

Generalmente se usan dos métodos para la ventilación de los pockets; a través de los rodillos de fieltro, (ver figura 26a) o con ductos exteriores (cajas de ventilación pockets) (Ver figura 26b). Estos sistemas también pueden ser utilizados para corregir el perfil de humedad de la hoja de papel.

¹⁸ SMOOK, Op. cit., p. 269.

Figura 26. Métodos de ventilación pockets



Fuente: SMOOK, Gary A. Handbook for pulp and paper technologists. 2 ed. Canadá: Angus Wilde Publications, 1992. p. 270.

5.4.11 Sistema de ventilación máquina de papel número cuatro (4) de PROPAL S.A. En PROPAL S.A. se tienen implementados sistemas de recuperación con el fin de usar parte del calor contenido en la mezcla aire-vapor que es extraída de la campana para precalentar el aire que se volverá a insuflar en los bolsillos (pockets).

✓ **Características principales de la campana de PROPAL S.A. planta 2.** En la máquina de papel 4 de PROPAL S.A. planta 2, se ha montado la campana en 2 partes y se ha dejado el Speed Sizer por fuera de las secciones de pre-secado y la post-secado. La campana es de tipo cerrada o también llamada campana de alto punto de rocío, están fabricadas con paneles aislados con lana de roca (Rockool) introducida entre las chapas interiores y exteriores de aluminio y lámina galvanizada respectivamente.

Esta campana proporciona un mejor control del aire de extracción y reposición, además de mantener un ambiente de trabajo favorable tanto en el interior como en el exterior de la misma, está relativamente bien sellada y aislada; la difusión de aire esta parcialmente eliminada; por lo tanto, la cantidad de aire ambiente que entra se reduce considerablemente, permitiendo que el proceso opere a alta temperatura.

Espesor de las chapas:

- 15/10 en chapa galvanizada.
- 10/10 en chapa de aluminio.

Coefficientes de transmisión:

- Paneles de techo: 0,37 Kcal. /h m²°C (Resistencia térmica 2.33 m² °C /W).
- Paneles de fachada: 0,50 Kcal. /h m² °C (Resistencia térmica 1.72 m² °C/W).

Tabla 3. Dimensiones generales de la campana

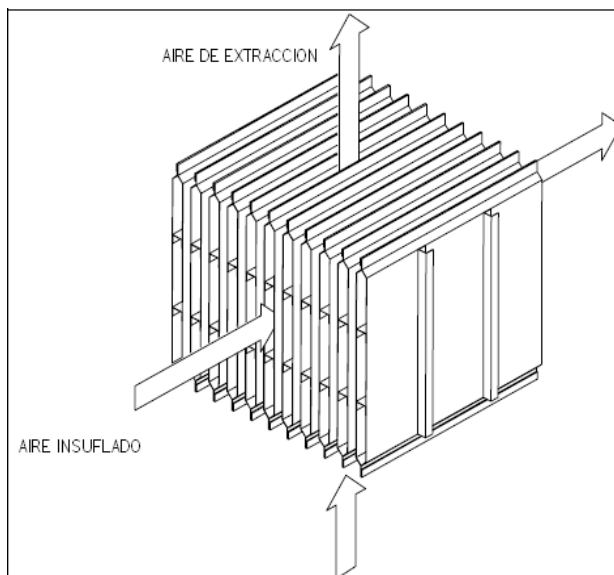
	Instalación de pre-secado.	Instalación de pos-secado.
	Encima de la tarima de trabajo.	
Longitud.	41.57 m	15.085 m
Ancho	10.8 m	10.8 m
Altura	7 m	7 m

✓ **Recuperación.** Las campanas de las secciones de pre-secado y pos-secado vienen unidas por medio de los ductos de extracción a un conjunto de recuperación de calor. La mezcla aire-vapor de agua que se encuentra en el interior de la campana, producto de la evaporación, es aspirada por siete ventiladores de extracción, de los cuales:

- Cinco ventiladores de extracción están instalados en la sección de pre-secado (4304HJ01 a 4304HJ04 y 4304HJ44).
- Dos ventiladores de extracción están instalados en la sección de pos-secado (4304HJ05 y 4304HJ06).

En cada uno de los grupos de extracción, entre el ventilador de extracción y la campana, excepto, en el extractor 4304HJ44, hay instalados unos recuperadores aire-aire de tipo VLF; básicamente este recuperador es un intercambiador de calor de flujo cruzado. Este recuperador está compuesto por chapas de aluminio, las cuales forman canales para la circulación horizontal del aire fresco y canales verticales para la circulación vertical del aire húmedo y caliente. Cada uno de estos recuperadores permiten precalentar el aire que se va a insuflar en las cavidades de la instalación de secado. La figura 27 es una imagen representativa de este tipo de intercambiadores.

Figura 27. Representación de un intercambiador de calor tipo VLF.



Fuente: Manual STA7700034. Operation and Maintenance Guidelines for Air, Steam, & Condensate Systems. Finland: METSO PAPER, 2002. p.45.

En la Tabla 4 se muestran los flujos de operación y de instalación en cada unidad de extracción existente en PROPAL S.A. estos datos serán de gran utilidad al momento de obtener los resultados por medio del programa implementado; estos resultados se muestran en el capítulo 9.

Tabla 4. Características técnicas de los ventiladores de extracción

Extractor	Tipo	Flujo capacidad instalada	Flujo de operación.	Presión estática.	Potencia necesaria en el eje del extractor.
		[m ³ /s]	[m ³ /s]	[Pa]	[KW]
4304HJ01	Axial.	16	16	600	14.3
4304HJ02		16	16	600	14.3
4304HJ03		16	16	600	14.3
4304HJ04		16	16	600	14.3
4304HJ05		12.7	10	600	11
4304HJ06		12.7	10	600	11
4304HJ44		31.7	31.7	500	21.1
4304HJ42	Centrifugo.	5.9	5.9	6000	46.9

Fuente: Plano 1937-001419B. Esquema de flujos. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda., 2007.

El ventilador de extracción 4304HJ42, aspira el aire que es insuflado en los dispositivos que se encuentran instalados en la sección de secado, tales como, cajas estabilizadoras (Duo-Stabilizer y S-Stabilizer). Este ventilador no contribuye en la aspiración del vapor de agua presente en el Hood; sin embargo, el aire que se extrae de estos dispositivos se encuentra a alta temperatura.

Figura 28. Grupo extractor de aire húmedo



En la Tabla 5 se muestran los valores de temperatura del aire en los ductos de extracción antes de hacer el intercambio de calor con el aire fresco. Los valores que se muestran, se midieron durante la operación normal de la máquina y serán aplicados para calcular la cantidad de aire que se debe extraer de la campana y los consumos energéticos.

Tabla 5. Temperatura del aire en los ductos de extracción

Batería.	Aire Extraído.	
	Temp bulbo seco.	Temp bulbo Húmedo.
	[°C]	[°C]
4304HJ01	66	49.6
4304HJ02	66	52.9
4304HJ03	67	55.9
4304HJ04	65	52.7
4304HJ05	66	48.7
4304HJ06	66	50.8
4304HJ44	66	51.7
4304HJ42	72	-

✓ **Ventilación de la instalación de secado.** La ventilación de la máquina de papel número cuatro (4), se logra gracias a una serie de ventiladores radiales que fuerzan el aire caliente a fluir a través de una red de tuberías que distribuyen el aire hacia cada uno de los ductos soplantes o cajas de ventilación pockets.

Estas cajas de ventilación son una serie de tuberías soplantes tipo PV, provistas de una serie de orificios, por los que se efectúa el soplado del aire; además, están equipadas con un elemento de regulación de caudal con el fin, de hacer correcciones de perfil o simplemente para regular el aire que está siendo soplado a la máquina.

Las tuberías PV de baja presión están instaladas en todas las cavidades de la sección de pre-secado, excepto en el primer y segundo grupo de secadores donde se han instalado cuatro cajas sopladoras (Blow Boxes), y un conjunto de tubos sopladores en la parte inferior; mientras que las tuberías PV de alta presión están instaladas en los dos grupos de cilindros secadores de la sección de post-secado.

La velocidad del aire caliente en los bolsillos de baja presión (Pre-sequería) es de 30 m/s. La velocidad del aire caliente en los bolsillos de alta presión (Post-sequería) es de 80 m/s. Temperatura del aire en los bolsos de 80 a 105 °C .

Los ventiladores encargados de la producción de aire son 4304HJ01 a 4304HJ06, 4304HJ43 y 4304HJ45, están instalados en la intemperie, salvo los ventiladores 4304HJ43 y 4304HJ45 que se encuentran instalados dentro del edificio.

- **El ventilador 4304HJ01.** Insufla aire a la sección de secado en la primera batería, a través de los tubos sopladores ubicados en la parte inferior de la misma.
- **Los ventiladores 4304HJ02 a 4304HJ06.** Tienen la función de insuflar aire a las secciones de secado, a través de las cajas de ventilación pockets.
- **El ventilador 4304HJ43.** suministra el aire requerido por los equipos instalados en la primera batería de la instalación de secado, equipos como: cajas sopladoras y cajas estabilizadoras (Duo-Stabilizer y S-Stabilizer).
- **El ventilador 4304HJ45.** Provee aire a la sección de secado por medio de los tubos sopladores, ubicados en la parte inferior de la segunda batería de secadores.

Cada uno de estos grupos, tiene instalado un conjunto de intercambiadores de calor donde el aire insuflado en la maquina es primero calentado por el aire húmedo y caliente que es extraído de las campanas, gracias al conjunto de intercambiadores aire-aire y a un grupo de intercambiadores cuyo fluido caliente es vapor flash y vapor vivo, salvo en los grupos 4304HJ43 y 4304HJ45 donde no hay recuperación de calor y el aire es calentado por medio de un solo

intercambiador de calor cuya sustancia térmica es el vapor vivo proveniente del cabezal principal.

Los intercambiadores de vapor flash y vapor vivo a los que se hace referencia son intercambiadores de flujo cruzado no mezclado, y están contruidos con tubos de SA-179 diámetro 1" y aletas cuadradas de aluminio. La distribución de los intercambiadores en las baterías y su respectiva sustancia de trabajo se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Distribución de intercambiadores de calor

Referencia intercambiador	Batería	Area total (C/I) [pies ²]	Coeficiente U [Btu/hr pie ²]	Sustancia de Trabajo	Sección de secado
37810A	4304HJ01	2284.91	2	vapor flash	Pre- secado
37954	4304HJ02				
37811B	4304HJ03			vapor vivo	
37812A	4304HJ04				
37813A	4304HJ05	1788	2	vapor flash	Post- secado
37955	4304HJ06			vapor vivo	
37814B					
37815A					
37816A	4304HJ43		2	vapor vivo	
37816A	4304HJ45		2	vapor vivo	

En la Tabla 7 se muestran los flujos de operación y de instalación en cada unidad de ventilación existente en PROPAL S.A. estos datos serán de gran utilidad para llevar a cabo los cálculos dentro del programa realizado y/o para realizar posibles comparaciones con los resultados obtenidos; los cuales, se muestran en el capítulo 9.

Tabla 7. Características técnicas de los ventiladores.

Ventilador.	Tipo	Flujo capacidad instalada	Flujo de operación.	Presión estática.	Potencia necesaria en el eje del extractor.
		[m ³ /s]	[m ³ /s]	[Pa]	[KW]
4304HJ01	Centrifugo.	11.9	11.9	1200	20.3
4304HJ02		11.9	11.9	1200	20.3
4304HJ03		11.9	11.9	1200	20.3
4304HJ04		11.9	11.9	1200	20.3
4304HJ05		9.4	6.6	3500	44.5
4304HJ06		9.4	7.6	3500	44.5
4304HJ43		8.9	8.9	3500	41.4
4304HJ45		7.3	7.3	2500	24.3

Fuente: Plano 1937-001419B. Esquema de flujos. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda., 2007.

En la Tabla 6 se muestra la distribución de los intercambiadores de calor en cada grupo de ventilación. A continuación se listan los valores de las temperaturas del aire medidas en la entrada y salida de cada grupo de intercambiadores; haciendo referencia a los intercambiadores de calor por su tipo de fluido térmico y no por su referencia de placa. (Ver Tabla 8).

Los datos de temperatura mostrados en esta tabla se obtuvieron en tres puntos, el primero a la salida del recuperador aire-aire, el segundo después de los intercambiadores que usan vapor flash, y el tercero en los intercambiadores que usan vapor vivo. (Ver Figura 29).

Figura 29. Puntos para la toma de temperaturas del aire



Tabla 8. Intercambiadores de calor

Batería.	Intercambiador Tipo.	Aire soplado.		Presión fluido caliente.
		Temp Entrada.	Temp Salida.	
		[°C]	[°C]	
4304HJ01	Aire-Aire	37	45.4	-
	Vapor Flash	45.4	61.8	0.5
	Vapor Vivo	61.8	95	3.5
4304HJ02	Aire-Aire	37	46.9	-
	Vapor Flash	46.9	65.6	0.5
	Vapor Vivo	80.9	91	3.5
4304HJ03	Aire-Aire	37	49.3	-
	Vapor Flash	49.3	65.2	0.5
	Vapor Vivo	65.2	88	3.5
4304HJ04	Aire-Aire	37	46.6	-
	Vapor Flash	46.6	80.5	0.5
	Vapor Vivo	80.5	89	3.5
4304HJ05	Aire-Aire	37	54.2	-
	Vapor Flash	54.2	64.6	0.5
	Vapor Vivo	64.6	83	3.5
4304HJ06	Aire-Aire	37	45.1	-
	Vapor Flash	45.1	67.5	0.5
	Vapor Vivo	67.5	101	3.5
4304HJ43	Vapor Vivo	36	43	3.5
4304HJ45	Vapor Vivo	36	45	3.5

Para la toma de estas temperaturas, se tuvo en cuenta las condiciones del aire ambiente dentro y fuera del edificio:

Temperatura de bulbo seco del aire ambiente: 37 °C.

Temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente: 23.3 °C.

Temperatura de bulbo seco del aire en el interior del edificio: 34.75 °C.

Temperatura de bulbo húmedo del aire en el interior del edificio: 29.3 °C.

Presión atmosférica: 90KPa aproximadamente.

✓ **Suministro de aire bajo techo.** La máquina de papel 4 de PROPAL S.A. planta 2 cuenta con un sistema de ventilación de aire caliente bajo techo, justo encima del Speed Sizer y de la mesa de formación; sobre la superficie interior del techo se fuerza una corriente de aire caliente, cuyo propósito es calentar la misma, evitando la condensación del vapor de agua que contiene el aire en el interior del edificio,

El exceso de vapor de agua bajo techo, al que se hace referencia, proviene de la evaporación en la parte húmeda de la máquina de papel y a posibles fugas de la campana; también, se han instalado dos techos falsos los cuales tienen el fin de evitar que la suciedad y las gotas de agua debidas a una posible condensación, caigan sobre la hoja.

El aire proveniente de los ventiladores 4304HJ07 (soplo de aire bajo el techo de la malla) y 4304HJ47 (soplo de aire bajo el techo del Speed Sizer), es calentado previamente mediante un intercambiador de calor (sustancia de trabajo vapor vivo) y distribuido a través de un ducto bajo el techo, con el fin, de evitar la condensación del vapor de agua en el aire sobre la superficie interior del mismo.

La temperatura del aire, requerida bajo techo, para evitar condensaciones, se puede encontrar a partir de un análisis de transferencia de calor como se muestra en el capítulo 6.

La Tabla 9 muestra las características técnicas de los ventiladores encargados del soplado de aire bajo techo.

Tabla 9. Características técnicas de los ventiladores

Ventilador.	Tipo.	Flujo capacidad instalada.	Flujo de operación.	Presión estática.	Potencia necesaria en el eje.
		[m ³ /s]	[m ³ /s]	[Pa]	[KW]
4304HJ07	Centrifugo.	11.11	11.11	1500	-
4304HJ47	Centrifugo	11.11	11.11	1500	-

Tabla 10. Temperatura del aire después del intercambio de calor

Batería.	Intercambiador Tipo.	Aire soplado.		Presión fluido caliente.
		Temp Entrada.	Temp Salida.	
		[°C]	[°C]	[barg]
4304HJ07	Vapor Vivo	37	48	3.5
4304HJ47	Vapor Vivo	37	65	3.5

6. MODELO TERMODINAMICO

6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE SECADO

El proceso de secado del papel por evaporación involucra muchas variables entre las cuales se pueden destacar las siguientes:

✓ **Humedad del papel.** la humedad se define como la cantidad de agua presente en cierta cantidad de masa. La humedad en el papel se expresa en forma de porcentaje como:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{fibra}} * 100 [\%] \quad (\text{Ecuacion 6.1.})$$

En la industria papelera, se suele usar el término porcentaje seco en lugar de humedad. El porcentaje seco se obtiene de:

$$\% \text{ Seco} = 100 - \% \text{ Humedad} [\%] \quad (\text{Ecuacion 6.2})$$

Para efectos de este trabajo se usa la humedad absoluta, la cual se define como, la razón entre la cantidad de agua y la cantidad de fibra o sólidos secos, así:

$$u = (100 / \% \text{ Seco}) - 1 \left[\frac{Kg \text{ } H_2O}{Kg \text{ Papel}} \right] \quad (\text{Ecuacion 6.3})$$

El contenido de humedad de la hoja de papel a la salida de las prensas, es una variable que comúnmente no se mide, pero que según el tipo de prensa y su estado, se puede estimar en un rango entre el 60 y el 64%. El contenido de humedad, afecta el proceso de secado en la medida en que una hoja demasiado húmeda en la entrada de la máquina o muy seca a la salida de la misma, requiere más calor y por lo tanto, más vapor para secarla.

✓ **Producción.** La producción es una función del peso del papel y la velocidad de operación de la máquina; por lo tanto, una alta producción puede significar que se esté produciendo un papel pesado, que la velocidad de operación es alta, o ambas. Si el peso del papel es alto esto significa que la hoja es gruesa y como consecuencia más difícil de secarla; por otro lado, si la velocidad es alta, se dispondrá de menos tiempo para evaporar cierta cantidad de agua con el consecuente aumento de consumo de vapor.

En este trabajo se hace referencia a la producción como el flujo masico de papel (\dot{m}_p). Este se calcula como:

$$\dot{m}_p = \frac{60 * V * \text{Ancho de la hoja} * \text{gramaje}}{3.6 * 10^6} \left[\frac{\text{Kg Papel}}{s} \right] \quad (\text{Ecuacion 6.4})$$

Donde:

V : Velocidad de operación de la máquina [m/min].

Ancho de la hoja : Ancho de la hoja de papel [m].

gramaje : Peso base del papel [gr/m²].

✓ **Grado de refinación.** El grado de refino afecta el “Freeness” (facilidad con la que el agua se drena de la hoja), y por lo tanto, el secado de la hoja.

✓ **Cantidad de Broke en el papel.** Si el papel que se está produciendo contiene cierta cantidad de Broke, este facilitará el secado, pues es más fácil de secar que la pulpa nueva.

✓ **Filler.** Un papel con pocos espacios entre las fibras, es más fácil de secar, pues contiene menos agua.

✓ **Temperatura de la hoja en la entrada de la sección de secado.** Si la temperatura de la hoja de papel a la entrada de la sección de secado es alta, la cantidad de vapor necesario para el calentamiento de la misma será menor.

✓ **Condición o estado de la lona.** Una lona sucia causará un aumento en la resistencia al transporte de masa y como consecuencia, una posible re-humectación del papel.

✓ **Tensión de la lona.** Una adecuada tensión en la lona asegura una buena transmisión térmica, debido al aumento del coeficiente de transferencia de calor por contacto entre el papel y el secador.

✓ **Aire de proceso.** Lo que se requiere es que la temperatura de bulbo húmedo sea lo suficientemente baja para obtener fuerzas de secado altas; sin embargo, la velocidad y la temperatura de bulbo seco del aire, también juegan un papel muy importante, ya que una alta temperatura del aire evitará un elevado enfriamiento de la hoja.

El aire de proceso al que se hace referencia, es el aire de insuflación y de extracción en la campana.

✓ **Tipo de pulpa.** El tipo de pulpa influye en las propiedades físicas del papel afectando el proceso de secado.

✓ **Vapor de arrastre.** Si la cantidad de vapor de arrastre usado en los cilindros secadores es inferior al requerido, el secador podría inundarse, afectando de esta manera la transferencia de calor debido al gran espesor de la película de condensado.

✓ **Presión del vapor.** Altas presiones de vapor conllevan a un alto consumo de vapor, a altas tasas de transferencia de calor, a altas tasas de evaporación y aumento de producción, entre otras.

✓ **Calibración del sifón.** Grandes espesores de película de condensando en el interior del cilindro secador disminuyen la transferencia de calor desde el vapor hacia el papel.

De las siguientes variables, se tomarán en cuenta para efectos prácticos, la humedad del papel, el peso del papel, la velocidad de la máquina, el aire del proceso y la presión del vapor en los cilindros secadores.

6.2 EL MODELO

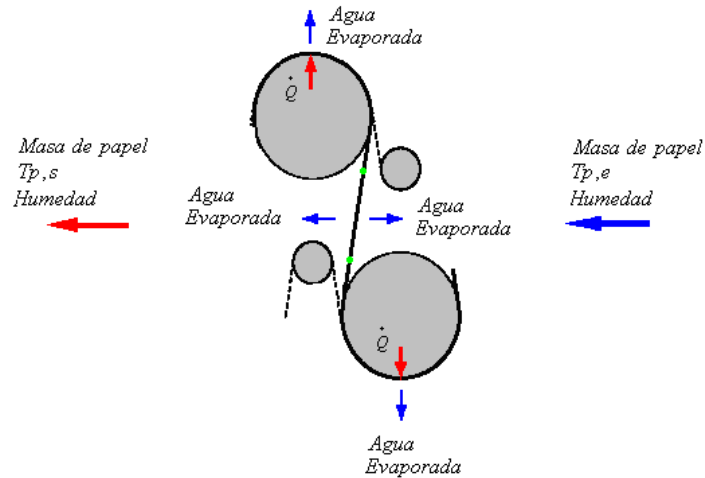
El proceso de secado es una función que depende de la humedad del papel, el peso, la velocidad de producción, la temperatura del papel, la presión del vapor en los cilindros secadores y la condición de la atmósfera en el interior de la máquina.

En el capítulo cinco (5) se hizo una descripción del secado del papel como un proceso de fases repetitivas, donde la evaporación de la hoja se lleva a cabo sobre la superficie del cilindro secador y en los espacios abiertos entre los mismos.

En este trabajo se asume, que toda el agua que se evapora del papel, lo hace sobre la superficie del cilindro secador, de no ser así, la cantidad de mediciones de temperatura que se deben hacer se incrementará, pues, la temperatura deberá

tomarse en dos puntos del papel por cada espacio entre secadores, lo que equivaldría para la MP-4 a realizar mas de cien tomas de temperatura, lo cual no es muy práctico cuando el manejo del instrumento del que se dispone es complejo, las condiciones en las cuales se deben realizar las tomas no son las mejores y el error en la toma de medidas es eminente.

Figura 30. Posibles puntos de toma de temperatura



Los puntos verdes en la figura 30 indican el sitio donde debería hacerse la toma de temperatura, si no se hiciera la suposición planteada en el párrafo anterior.

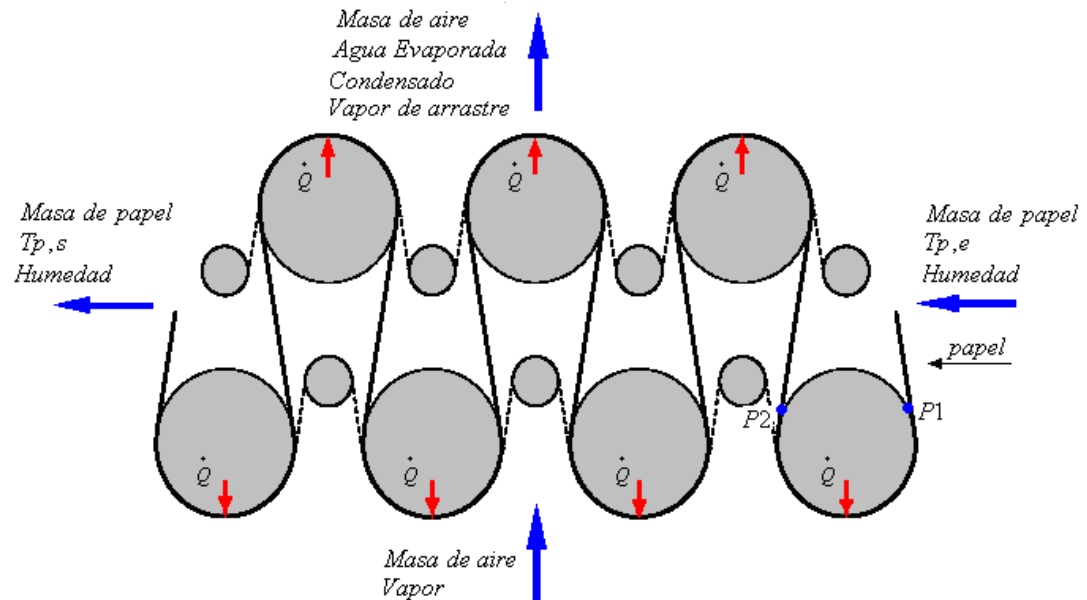
El modelo que se presenta a continuación está basado en condiciones de transferencia de calor unidimensionales y de estado estable; este modelo, se basa en un análisis por grupo de secadores, por lo tanto, los balances de masa y energía que se presentan, se aplican para cada uno sin hacer distinción alguna de las ecuaciones; en este orden de ideas, se supone que cada grupo de secadores se comportará como una superficie, con un área equivalente al área de todos los secadores que conforman dicho grupo, como resultado, el calor transferido a través de dicha superficie será la suma del calor transferido a través de cada cilindro; además, la hoja de papel será suficientemente delgada, uniforme y conductora como para que la temperatura del papel en la superficie en contacto con el secador, sea igual a la temperatura en la superficie exterior del mismo, con esto se evitará la necesidad de calcular la conductividad térmica del papel y de realizar mediciones complicadas de temperatura.

En el capítulo cinco (5) se observaron los diferentes tipos de configuración de los cilindros en la sección de secado, cuando el grupo que se analiza tiene una

configuración de hilera única, el área a tener en cuenta, es el área de los secadores activos (secadores que están en contacto directo con el papel).

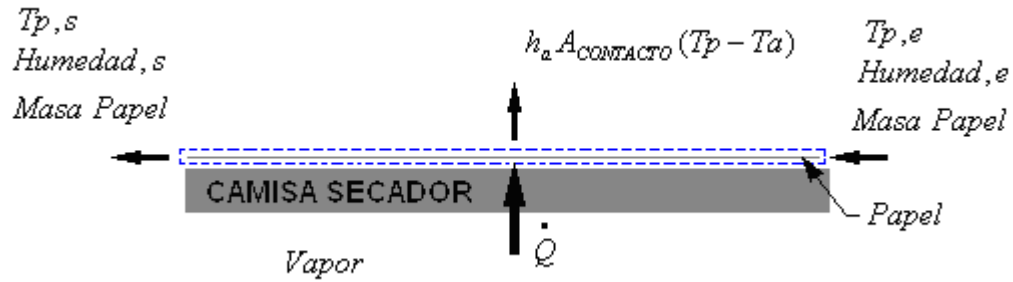
La Figura 31 esquematiza la dirección de los flujos involucrados en el proceso de secado en cada grupo de cilindros secadores, a partir de este, se obtiene un sistema equivalente en el cual se traza el volumen de control sobre el papel. Figura 32.

Figura 31. Flujos involucrados en el proceso



Los puntos $P1$ y $P2$ definen la porción de papel que está en contacto con el cilindro, esta longitud se midió usando los planos existentes en PROPAL S.A. la longitud de papel en contacto con el secador, se representa como L_c .

Figura 32. Volumen de control



6.2.1 Balance de masa papel.

$$\frac{d \dot{m}_{sist}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

$$\frac{d \dot{m}_{sist}}{dt} = \dot{m}_P + u_0 \dot{m}_P - \dot{m}_P - u \dot{m}_P - \dot{m}_{EVAP}$$

Donde \dot{m}_P se refiere a la rata de masa del papel, el término u_0 es la humedad absoluta inicial, y se obtiene del dato de que el porcentaje de humedad de la hoja a la salida de prensas está en el rango de 60 a 64%. Los términos $u_0 \dot{m}_P$ y $u \dot{m}_P$ se refieren a la cantidad de agua con la que entra y sale el papel del grupo de cilindros respectivamente.

Bajo las condiciones de flujo estable (equilibrio) tenemos que:

$$0 = \dot{m}_P + u_0 \dot{m}_P - \dot{m}_P - u \dot{m}_P - \dot{m}_{EVAP}$$

$$\dot{m}_{EVAP} = (u_0 - u) \dot{m}_P \left[\frac{Kg H_2O}{s} \right] \quad (Ecuacion 6.5)$$

\dot{m}_{EVAP} : Cantidad de agua evaporada del papel por unidad de tiempo [Kg/s].

La cantidad de agua evaporada (\dot{m}_{EVAP}), además de ser calculada por la ecuación 6.5, también puede ser calculada bajo los conceptos de la transferencia de masa; sin embargo, surgirá la necesidad de tomar temperaturas de bulbo húmedo y seco en el aire de los bolsillos para determinar presiones parciales o para determinar la humedad del mismo. Este método tiene la desventaja de que aumenta la cantidad de variables y por lo tanto la cantidad de medidas que deben hacerse, además de

la incertidumbre debida a la evaporación, que tiene lugar sobre la superficie del secador, donde es imposible tomar dichas temperaturas sin contar con el hecho de que el aire en el interior de la maquina es común a todos los grupos de secadores, pero cabe anotar que la introducción de este método simplificaría el proceso en cuanto a la solución de las ecuaciones. A continuación se muestran las ecuaciones para ilustrar las variables involucradas si este fuera el método a seguir.

“El gradiente de presiones de vapor del aire en la zona de difusión es la diferencia entre la de la superficie del papel, y la del aire, “la ley de difusión de masa de Fick” establece la siguiente relación para el gradiente y la difusión de masa de agua”¹⁹.

$$\dot{m}_{EVAP} = \sigma_m A (P_{agua,Aire} - P_{agua,Hoja}) \quad (Ecuación 6.6)$$

Donde:

σ_m : Coeficiente de difusión de masa [Kg/m²s].

A : Área [m²].

$P_{agua,Aire}$: Presión del vapor de agua en el aire.

$P_{agua,Hoja}$: Presión del agua en el papel.

Lewis propuso un número adimensional que compara los efectos de la difusión de calor y de masa:

$$Le = \frac{h_{FLUIDO}}{C_{P FLUIDO} \sigma_m}$$

Donde:

h_{FLUIDO} : Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m² °C].

Para un amplio rango de temperaturas, en el caso de aire húmedo el valor de Le es próximo a la unidad.

¹⁹ Termodinámica 2005 [en línea]: Aire húmedo. Argentina: uncoma, 2007. [consultado 13 de junio de 2007]. Disponible en Internet: http://fain.uncoma.edu.ar/prof_tec/mecanic/termodin/aire_humedo_2005_1.pdf

6.2.2 Balance de masa para el cilindro secador.

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = \dot{m}_{VAPOR} - \dot{m}_{VA} - \dot{m}_{flash} - \dot{m}_C$$

Donde:

\dot{m}_{VAPOR} : Flujo másico de vapor [Kg/s].

\dot{m}_{VA} : Flujo másico de vapor de arrastre [Kg/s].

\dot{m}_{flash} : Flujo másico de vapor Flash [Kg/s].

\dot{m}_C : Flujo másico de condensado que sale por el sifón [Kg/s].

Debido al diferencial de presión que se establece entre el vapor y la línea de condensado fuera del cilindro secador, es posible llevar a cabo el proceso de drenaje del mismo; sin embargo, dicho condensado no es evacuado del secador como líquido saturado sino como una mezcla líquido – vapor. Una parte del vapor presente en la mezcla, se debe a la vaporización del condensado debido a la caída de presión experimentada en el sifón (el vapor al que se hace referencia es el vapor flash), el vapor restante proviene de la succión que ejerce el sistema de drenaje de condensado sobre el vapor que se encuentra en el interior del cilindro secador, a este vapor se le conoce como vapor de arrastre, “el cual típicamente es una fracción de masa de condensado cerca de 15-20%”²⁰.

A pesar del dato teórico que se tiene, determinar la cantidad de vapor de arrastre que sale por el sifón es una tarea difícil. Para efectos prácticos se asume que la masa que fluye fuera del secador es una mezcla de condensado y vapor flash ($\dot{m}_{VA} = 0$), además se asumirá que el vapor introducido al secador es saturado y seco.

De la ecuación 5.8 se obtiene la fracción de vapor flash que se forma a partir de una determinada masa de condensado.

$$\dot{m}_{flash} = F_{VAPOR} * \dot{m}_C \quad (\text{Ecuacion 6.7})$$

Bajo la suposición de flujo estable y reemplazando la ecuación 6.7 en el balance de masa:

²⁰ SMOOK, Op. cit., p. 268.

$$0 = \dot{m}_{VAPOR} - \dot{m}_{flash} - \dot{m}_C$$

$$\dot{m}_{VAPOR} = (1 + F_{VAPOR}) * \dot{m}_C \left[\frac{Kg \text{ Vapor}}{s} \right] \quad (Ecuacion 6.8)$$

6.2.3 Balance de energía para el papel.

$$\frac{dE_{SIST}}{dt} = \dot{E}_e - \dot{E}_s =$$

$$\dot{Q} + \dot{m}_P C_{PP,e} T_{P,e} (1 + u_0) - \dot{m}_P C_{PP,s} T_{P,s} (1 + u) - \dot{m}_{EVAP} h_{EVAP} - \frac{h_a A_{CONT} (T_{PROM} - T_a)}{1000}$$

Para flujo estable y reemplazando la ecuación 6.5 se obtiene el calor necesario para elevar la temperatura de la hoja desde $T_{P,e}$ hasta $T_{P,s}$ y para evaporar el agua que contiene.

$$\dot{Q} = \dot{m}_P C_{P,P,s} T_{P,s} (1 + u) - \dot{m}_P C_{P,P,e} T_{P,e} (1 + u_0) + (u_0 - u) \dot{m}_P h_{EVAP} + \frac{h_a A_{CONT} (T_{PROM} - T_a)}{1000}$$

(Ecuacion 6.9)

Donde:

\dot{Q} : Calor necesario para elevar la temperatura de las fibras, del agua y para evaporar el agua que contiene [KW].

h_{EVAP} : Entalpía de evaporización o calor latente del agua en la hoja de papel [KJ/Kg].

$$h_{EVAP} = 2501.3 - (2.39 * T_{PROM}) \left[\frac{KJ}{Kg} \right] \quad (Ecuación 6.10)$$

Los valores para la entalpía de evaporización del agua en el papel calculados con la ecuación 6.10 se aproximan a los valores tabulados para las propiedades del agua en el texto transferencia de calor de Yunus A. Çengel con un error menor o igual a 1% para los rangos de temperatura entre 0 y 100 grados centígrados.

$$T_{PROM} = \frac{T_{P,e} + T_{P,s}}{2} \quad (Ecuación 6.11)$$

T_{PROM} : Temperatura promedio del papel [°C].

$C_{P,P}$: Calor específico del papel [KJ/Kg °C].

✓ **Calor específico del papel.** El calor específico del papel se calcula como el promedio del calor específico de la fibra y del agua. La expresión para determinarlo se tomó de la tesis de Persson H.

$$C_{P,P} = \frac{C_{P,f} + (u * C_{P,H2O})}{1 + u} \left[\frac{KJ}{Kg * ^\circ C} \right] \quad (Ecuacion \ 6.12)$$

$C_{P,f}$: Calor específico de las fibras.

$C_{P,H2O}$: Calor específico del agua [KJ/Kg °C].

✓ **Calor específico del agua.** El calor específico del agua en el papel se obtiene de una función que depende de la presión de saturación del agua. Esta función se obtuvo a partir de los datos tabulados en las tablas de las propiedades del agua del texto transferencia de calor de Yunus A. Çengel ajustando dichos datos a una curva aplicando el método de mínimos cuadrados.

$$C_{P,H2O} = \frac{0.34(\ln(P_{Sat}))^4 - 3.4(\ln(P_{Sat}))^3 + 15.88(\ln(P_{Sat}))^2 - 30.9(\ln(P_{Sat})) + 4198.87}{1000} \quad (Ecuación \ 6.13)$$

La presión de saturación del agua en el papel se puede calcular, aproximadamente, en función de la temperatura promedio del papel mediante la utilización de la siguiente ecuación:

$$P_{Sat} = \frac{10^{\left(10.092 - \frac{1668}{228 + T_{PROM}}\right)}}{1000} [KPa] \quad (Ecuacion \ 6.14)$$

$$u_{PROM} = \frac{u_0 + u}{2} \quad (Ecuacion \ 6.15)$$

u_{PROM} : Humedad absoluta promedio del papel [Kg H₂O/Kg papel].

T_a : Temperatura del aire en los alrededores [$^{\circ}\text{C}$].

h_a : Coeficiente de transferencia de calor por convección sobre la superficie del papel. [$\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$].

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor debida a la convección sobre la superficie del papel, se desprecian los efectos de la lona sobre la corriente de aire.

El coeficiente combinado de transferencia de calor por convección h_a se calcula por medio de las ecuaciones 5.36, 5.43 y 5.44. La ecuación 5.44 es aplicable siempre que se conozca la velocidad a la que se sopla el aire sobre el papel.

Las propiedades termodinámicas del aire (ecuaciones 5.18 a 5.22) para el calculo de los números adimensionales (ecuaciones 5.26 a 5.29), para este caso en particular, se evalúan a la temperatura de película haciendo $T_{\text{SUP}}=T_{\text{PROM}}$ en la ecuación 5.30.

6.2.4 Balance de energía para el cilindro secador. Con la ecuación 6.9 se obtuvo la cantidad de calor necesaria para calentar y evaporar cierta cantidad de agua contenida en la hoja de papel. A continuación, se mostrará el balance de energía sobre el cilindro secador para determinar la cantidad de energía que cede el vapor de agua en el interior del cilindro secador, durante su condensación.

$$\frac{dE_{\text{SIST}}}{dt} = E_e - E_s$$

$$\frac{dE_{\text{SIST}}}{dt} = \dot{Q} + \dot{m}_{\text{VAPOR}} h_g - \dot{m}_{\text{flash}} h_{\text{flash}} - \dot{m}_C h_f$$

Bajo condiciones de flujo estable:

$$0 = \dot{m}_{\text{VAPOR}} h_g - \dot{m}_{\text{flash}} h_{\text{flash}} - \dot{m}_C h_f - \dot{Q}$$

Reemplazando la ecuación 6.7 y 6.8:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{VAPOR}} h_g - \dot{m}_{\text{flash}} h_{\text{flash}} - \dot{m}_C h_f$$

$$\dot{Q} = \left[(1 + F_{\text{VAPOR}}) h_g - (F_{\text{VAPOR}}) h_{\text{flash}} - h_f \right] \dot{m}_C \text{ [KW]} \quad (\text{Ecuacion 6.16})$$

Donde:

h_g : Entalpía del vapor saturado [KJ/Kg]. Se calcula con la ecuación 5.2.

h_f : Entalpía del agua saturada [KJ/Kg]. Se calcula con la ecuación 5.1.

h_{flash} : Entalpía del vapor flash [KJ/Kg]. $h_{flash} = h @ Presion = P_l$

La entalpía del vapor flash se calcula con la ecuación 5.2 pero en lugar de la presión absoluta de saturación del vapor (P_v) se reemplaza la presión absoluta en la línea de condensado o presión del tanque flash de esa sección (P_l)

P_l : Presión absoluta en la línea de condensado [Pa].

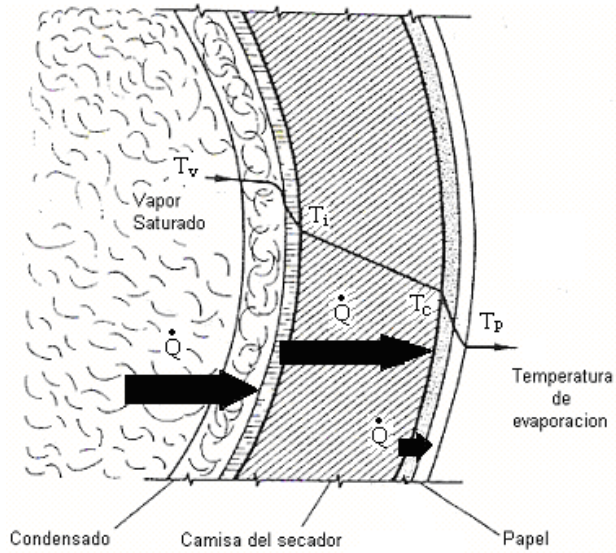
$P_l : P_v - \Delta P$ (Ecuacion 6.17)

ΔP : Diferencia de presión entre la del vapor y la línea de condensado [Pa].

Para determinar la rata de transferencia de calor desde el interior del secador hasta el papel, se deben encontrar los flujos de calor a través de cada resistencia térmica impuesta por el sistema. Para tal objetivo se supone que:

- ✓ La superficie interna del secador no tiene incrustaciones, por lo tanto la resistencia térmica impuesta por esta es despreciable.
- ✓ Los doctors mantienen la superficie externa del secador limpia; entonces, se desprecia la resistencia al flujo de calor impuesta por la suciedad.
- ✓ No existe aire entre el papel y la superficie del secador.
- ✓ Se desprecia la conductividad térmica del papel.

Figura 33. Flujo de calor a través de cada resistencia térmica



Fuente: SMOOK, Gary A. Handbook for pulp and paper technologists. 2 ed. Canadá: Agnus Wilde Publications, 1992. p. 269.

✓ **El flujo de calor a través de la película de condensado.**

$$\dot{Q} = \frac{n h_c^* A_{int} (T_v - T_i)}{1000} [KW] \quad (\text{Ecuación 6.18})$$

Donde:

T_v : Temperatura de saturación del vapor [°C].

La temperatura de saturación del vapor se puede calcular de manera aproximada para un rango de presión de 1 a 3000 KPa con un error inferior al 1% por medio de la ecuación:

$$T_v = (0.1723(\ln(P_v))^3 - 3.388(\ln(P_v))^2 + 37.71(\ln(P_v)) + 124.5) - 273.15 \quad (\text{Ecuación 6.19})$$

T_i : Temperatura en la superficie interna de la camisa del secador [°C].

A_{int} : Área de la superficie interna de la camisa del cilindro secador [m²].

$$A_{int} = \pi * (D - (2e)) * L_e \quad (\text{Ecuación 6.20})$$

n : Numero de secadores activos que conforman el grupo.

D : Diámetro del cilindro secador [m].

L_e : Longitud de la superficie efectiva de la camisa del secador [m].

e : Espesor de la camisa del secador [m].

h_c^* : Coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del cilindro secador debido a la película de condensado o coeficiente de película [W/m² °C].

• **Coeficiente de película de condensado (h_c^*).** Para determinar este coeficiente de transferencia de calor por condensación, se toma la formula empírica de HEIKKILA Pertti, la cual tiene en cuenta la hidrodinámica de la película de condensado y su espesor. La cual es afectada por la velocidad de la maquina, el diámetro de los cilindros, y las barras de turbulencia dentro del secador.

$$h_c = \left(\frac{685}{s} + \frac{1 * 10^6}{275 + (0.675 V^{2.79}) + (0.0486 s V^{3.39})} \right) \quad (\text{Ecuacion 6.21})$$

Donde:

s : Espesor de la película de condensado (calibración del sifón) [m].

Cuando el secador tiene instaladas barras de turbulencia el valor del coeficiente de película de condensado debe ser corregido por un factor:

$$h_c^* = \left(\frac{5700 + (60 * V)}{6000} \right) * h_c \quad (\text{Ecuacion 6.22})$$

✓ **Flujo de calor a través de la camisa del secador.**

$$\dot{Q} = (2 * 10^{-3}) n \pi k L_e \frac{(T_i - T_c)}{\ln\left(\frac{D}{D - 2e}\right)} \quad [KW] \quad (\text{Ecuación 6.23})$$

Donde:

T_C : Temperatura de la superficie externa de la camisa del secador [°C].

k : Conductividad térmica de la camisa del secador [W/m² °C]. (45-59)

✓ **Flujo de calor por contacto (secador – papel).**

$$\dot{Q} = \frac{n * h_{CONT} A_{CONT} (T_C - T_{PROM})}{1000} [KW] \quad (Ecuación 6.24)$$

Donde:

$$A_{CONT} = \sum_{i=1}^n (L_{C,i} * \text{Ancho del papel}) \quad (Ecuación 6.25)$$

$$\text{Ancho del papel} = 6.19 [m].$$

$$A_{EXT} = \pi * D * L_e \quad (Ecuación 6.26)$$

$$A_{CONT} = f_c * A_{EXT} \quad (Ecuación 6.27)$$

En lugar de la ecuación 6.25 se puede usar la ecuación 6.27 cuando no se dispone de la longitud de porción de papel que envuelve cada cilindro en la sección de secado.

f_c : Factor de contacto. Con base en las mediciones realizadas se encontró que este factor es 0.51 para el primer grupo de secadores, 0.48 para el segundo grupo, 0.46 para el tercer grupo, 0.47 para el cuarto grupo, 0.51 para el quinto, quinto A y sexto grupo.

h_{CONT} : Coeficiente de transferencia de calor por contacto [W/m² °C].

• **Coeficiente de contacto entre el papel y la camisa del secador (h_{CONT}).**

Wilhelsson y Persson asumen que el coeficiente de contacto entre la camisa del secador y el papel tiene un comportamiento linealmente dependiente de la humedad absoluta:

$$h_{CONT} = h_{CONT,(0)} + h_{CONT,i} * u \quad (Ecuación 6.28)$$

Donde:

$$h_{CONT,(0)} = 200 - 500 \left[W / m^2 \text{ } ^\circ C \right]$$

$$h_{CONT,i} = 900 - 1200 \left[W / m^2 \text{ } ^\circ C \right]$$

Como el análisis que se sigue es por grupo de secadores en este trabajo se usa el valor de la humedad promedio (u_{PROM}) en lugar del valor de la humedad (u) a la salida de cada secador, además se utilizan valores de $h_{CONT,(0)} = 400 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ C$ y $h_{CONT,i} = 955 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ C$ cuando el peso del papel es 75 gr/m^2 . Estos valores se deben cambiar dependiendo del peso del papel producido; se encontró que para papeles cuyo peso es menor o igual a 60 gr/m^2 $h_{CONT,(0)} = 200 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ C$ y $h_{CONT,i}$ puede ser incluso menor a $800 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ C$.

$$h_{CONT} = 400 + 955 * u_{PROM} \left[W / m^2 \text{ } ^\circ C \right] \quad (\text{Ecuación 6.29})$$

Cabe anotar que “la transferencia de calor será independiente de la tensión de la lona si la tensión está en el intervalo de 2-6 KN”²¹ como es el caso de la MP-4 (tensión de la lona 4 KN) además la ecuación 6.32 no incluye los efectos de la suciedad sobre la superficie de la camisa del cilindro; por lo tanto, se debe asegurar un buen funcionamiento de los doctors y mantener una tensión de la lona dentro de los rangos recomendados por TAPPI en el TIP 0404-04.

Una vez se combinan las ecuaciones se obtiene una ecuación algebraica de segundo grado de la forma:

$$C_1 u_{PROM}^2 + C_2 u_{PROM} = C_3$$

Donde C_1 , C_2 , y C_3 son los coeficientes que resultan de combinar las ecuaciones. Una vez encontrada u_{PROM} solo hay que reemplazar los valores en las ecuaciones mostradas anteriormente para obtener los demás datos.

²¹ SLÄTTEKE, Ola. Modelling and control of the paper machine drying section. Sweden, 2006. p. 73-93. Doctoral Dissertation (Doctor). Lund institute of technology. Department of Automatic Control.

6.2.5 Pérdidas de calor en los cilindros secadores.

✓ **Calor perdido por la superficie del secador que no está en contacto con el papel.**

$$\dot{Q}_{P,SEC} = \frac{n^*(h_a + h_{RAD})(A_{EXT} - A_{CONT})(T_C - T_a)}{1000} [KW] \quad (Ecuación 6.30)$$

Donde:

$h_{a,D}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección. [W/m² °C].

Se obtiene de combinar las ecuaciones 5.36, 5.43 y 5.46. Las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura de película ecuación 5.30 haciendo $T_{SUP} = T_C$.

h_{RAD} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación [W/m² °C]. Ecuaciones 5.47 y 5.48; la emisividad de la superficie $\varepsilon_1 = 0.21$ se toma de la Tabla Anexo A.

Wilhelmsson ha reportado que las perdidas de calor por la superficie del cilindro secador que no esta en contacto con el papel debidas a la convección y a la radiación representan solo el 1-2% del calor total suministrado.

✓ **Calor perdido a través de las tapas del secador.**

$$\dot{Q}_{P,TAPA} = \frac{2n(h_{a,L} + h_{RAD})A_{TAPA}(T_{SUP} - T_a)}{1000} [KW] \quad (Ecuación 6.31)$$

Donde:

T_{SUP} : Temperatura superficial de la tapa del cilindro secador se asume igual a la temperatura de la superficie externa de la camisa del cilindro secador aunque la temperatura de la tapa esta unos cuantos grados por encima de la temperatura de la camisa del cilindro secador. [°C].

T_a : Temperatura del aire en los alrededores [°C].

A_{TAPA} : Área de la tapa del secador [m²].

$$A_{TAPA} = \frac{\pi D_T^2}{4} \quad (\text{Ecuacion 6.32})$$

D_T : Diámetro de la tapa [m].

$h_{a,L}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección sobre la superficie de la tapa del cilindro secador. [W/m² °C].

Para el fenómeno de convección natural sobre una placa plana vertical con $L_{\text{CHARACT}} = D_T$. El coeficiente de transferencia de calor por convección se obtiene de combinar las ecuaciones 5.36 y 5.39. Las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura de película ecuación 5.30 haciendo $T_{\text{SUP}} = T_C$.

h_{RAD} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación [W/m² °C]. Ecuaciones 5.47 y 5.48; la emisividad de la superficie $\varepsilon_1 = 0.64$ se toma de la Tabla Anexo A.

✓ **Pérdidas de energía debidas al vapor flash que no es reutilizado.** Como se mencionó anteriormente, los sistemas de vapor en cascada tiene como principal desventaja la interdependencia entre grupos, además del desaprovechamiento de la energía contenida en el vapor flash formado en el separador del primer grupo de secadores (grupo con la menor presión del sistema; por consiguiente, con la mayor cantidad de calor latente contenido en el vapor). La energía contenida en el vapor flash que es obligado a condensarse se calcula como:

$$\dot{Q}_{P,FLASH} = \dot{m}_{flash} (h_{flash} - h_f) [KW] \quad (\text{Ecuación 6.33})$$

La entalpía del vapor flash (h_{flash}) se calcula de la ecuación 5.2 reemplazando la presión de alimentación de Vapor (P_v) por la presión en la línea de condensado o en el respectivo tanque flash (P_l). La entalpía o calor sensible del agua (h_f) se puede calcular aproximadamente en función de la temperatura como:

$$h_f = 4.21 * T_{COND} \quad (\text{Ecuación 6.34})$$

Donde:

T_{COND} : Temperatura de la recuperación de condensados. [°C].

6.2.6 Consumo de vapor en secadores. El consumo de vapor en cada grupo de cilindros secadores se obtiene de combinar las ecuaciones 6.8, 6.9 y 6.16 haciendo la salvedad de que el calor transferido (\dot{Q}) en la ecuación 6.16 es la suma del calor que toma el papel y la pérdida de calor por las superficies del secador debidas a la radiación y a la convección.

$$\dot{m}_{VAPOR,T} = \frac{\left(\dot{Q} + \dot{Q}_{PERDIDO/G} \right) (1 + F_{VAPOR})}{\left[(1 + F_{VAPOR}) h_g - F_{VAPOR} h_{flash} - h_f \right]} \quad (Ecuación 6.35)$$

$$\dot{Q}_{PERDIDO/G} = \dot{Q}_{P,TAPA} + \dot{Q}_{P,SEC} \quad (Ecuación 6.36)$$

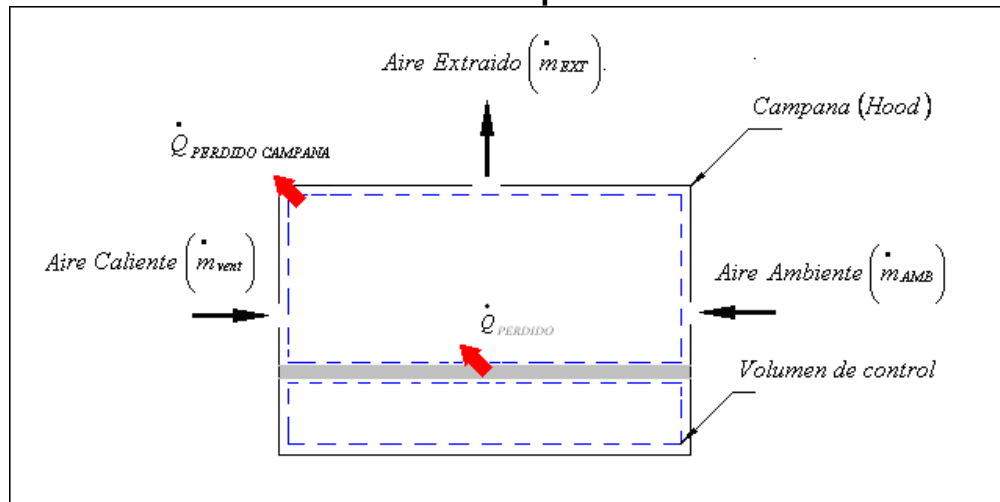
Donde:

$\dot{m}_{VAPOR,T}$: Consumo de vapor por grupo de secadores [Kg/s].

$\dot{Q}_{PERDIDO/G}$: Calor total perdido en cada grupo de cilindros secadores [KW].

6.2.7 Balance de masa y energía para el aire en la campana. El balance de masa que se cita a continuación se aplica a cada campana (sin hacer distinción alguna de las ecuaciones para cada una de ellas). Debido a que tanto el aire que se extrae de la campana como el que se introduce en la misma contiene humedad, se realizan dos balances de masa, uno en el que se considera el aire seco y el otro para el agua que contiene el aire.

Figura 34. Volumen de control en la campana



✓ **Balance de masa para el aire**

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = \dot{m}_{vent} + \dot{m}_{AMB} - \dot{m}_{EXT}$$

Bajo condiciones de flujo estable:

$$\dot{m}_{EXT} = \dot{m}_{vent} + \dot{m}_{AMB} \left[\frac{Kg}{s} \right] \quad (Ecuacion 6.37)$$

✓ **Balance de masa para el agua contenida en el aire**

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = \dot{m}_{vent} \omega_o + \dot{m}_{AMB} \omega_o - \dot{m}_{EXT} \omega - \dot{m}_{EVAP}$$

Bajo condiciones de flujo estable y reemplazando la ecuación 6.5 y 6.37:

$$\dot{m}_{EXT} = \frac{(\dot{u}_o - \dot{u}_f) \dot{m}_P}{\omega - \omega_o} \quad (Ecuación 6.38)$$

Donde:

u_o : Humedad absoluta inicial del papel (antes de ingresar a cada sección) [Kg H₂O/Kg papel].

u_f : Humedad absoluta final del papel en la salida de cada sección [Kg H₂O/Kg papel].

\dot{m}_{EXT} : Masa de aire total extraída de la campana de cada sección (pre-sequería y pos-sequería) [Kg/s].

\dot{m}_{vent} : Masa de aire caliente total insuflada en la campana (Hood) de cada sección (pre-sequería y post-sequería) [Kg/s].

\dot{m}_{AMB} : Masa de aire fresco que se introduce a la campana de cada sección por medio de aberturas [Kg/s].

ω_o : Humedad específica del aire ambiente [Kg H₂O/Kg Aire].

ω : Humedad específica del aire que se extrae de la campana en cuestión [Kg H₂O/Kg Aire].

Para obtener los valores de las humedades ω_o y ω se deben realizar las mediciones de temperatura de bulbo húmedo y seco en las respectivas corrientes de aire involucradas y luego se aplican las ecuaciones 5.9 a 5.16; los valores de la entalpía del vapor ($h_{g,b}$ ecuación 5.2) y de la entalpía del agua ($h_{f,b}$ ecuación 5.1) en la ecuación 5.14, están en función de la presión del vapor equivalente a la temperatura de bulbo húmedo ($P_{v,b}$ ecuación 5.15).

La cantidad de aire que se introduce por medio de los ventiladores a la campana (\dot{m}_{vent}), se calcula con base en los datos del manual de construcción de la maquina, en el cual se hace referencia a que la cantidad de aire caliente que debe ser insuflado es el 80 % del aire que esta siendo extraído, por lo tanto, el 20 % restante (\dot{m}_{AMB}) es aire que se introduce por rendijas y puertas abiertas:

$$\dot{m}_{vent} = 0.8 \dot{m}_{EXT} \quad (\text{Ecuación 6.39})$$

$$\dot{m}_{AMB} = 0.2 \dot{m}_{EXT} \quad (\text{Ecuación 6.40})$$

La cantidad de aire extraído e insuflado obtenido por medio de las ecuaciones 6.38, 6.39 y 6.40 debe dividirse entre el número de unidades de extracción y ventilación existentes, con el fin de determinar una rata de masa unitaria que es útil para los cálculos posteriores.

✓ **Balance de energía.** De aquí en adelante los subíndices “e” y “s” se usarán para referirse al estado de la sustancia en la entrada y salida de un proceso térmico.

Con las ecuaciones 6.30 y 6.31, se calculan las pérdidas de calor por las superficies de los secadores, a continuación se presenta otro método que permite cuantificar dichas pérdidas de manera general. Los resultados obtenidos sirven para comparar los dos métodos.

$$\frac{dE_{sist}}{dt} = \dot{E}_e - \dot{E}_s$$

$$\frac{dE_{sist}}{dt} = \dot{m}_{vent} h_e + \dot{m}_{AMB} h_{AMB} + \dot{Q}_{PERDIDO} - \dot{m}_{EXT} h_s - \dot{Q}_{PERDIDO\ CAMPANA}$$

Bajo las condiciones de flujo estable:

$$0 = \dot{m}_{vent} h_e + \dot{m}_{AMB} h_{AMB} + \dot{Q}_{PERDIDO} - \dot{m}_{EXT} h_s - \dot{Q}_{PERDIDO\ CAMPANA}$$

$$\dot{Q}_{PERDIDO,T} = \dot{m}_{EXT} h_s - \dot{m}_{vent} h_e - \dot{m}_{AMB} h_{AMB} + \dot{Q}_{PERDIDO\ CAMPANA} \quad (\text{Ecuación 6.41})$$

Donde:

$\dot{Q}_{PERDIDO,T}$: Pérdidas de calor en los secadores que conforman la sección.

$\dot{Q}_{PERDIDO\ CAMPANA}$: Calor perdido por las superficies de la campana.

h_{AMB} : Entalpía o energía contenida en el aire a la temperatura ambiente [KJ/Kg].

h_e : Energía contenida en el aire caliente insuflado a la campana [KJ/Kg].

h_s : Energía contenida en el aire extraído de la campana.

Las entalpías h_e , h_s y h_{AMB} del aire atmosférico se calculan según la definición vista en el capítulo 5 (ecuación 5.17).

$$h_e = C_{pa} T_e + \omega_o h_{g,e}$$

$$h_s = C_{pa} T_s + \omega h_{g,s}$$

$$h_{AMB} = C_{pa} T_{AMB} + \omega_o h_{g,AMB}$$

Los términos $h_{g,e}$, $h_{g,s}$ y $h_{g,AMB}$ se obtienen de la ecuación 5.2 reemplazando el valor de la presión (P_v) por el valor de la presión de saturación del vapor a la temperatura del aire en el estado especificado o haciendo uso de las tablas de las propiedades termodinámicas del agua a la temperatura del aire.

✓ **Energía recuperada del aire extraído de la campana.** Como se mencionó anteriormente, el sistema de recuperación de PROPAL S.A. tiene como

función el precalentamiento del aire que va a ser insuflado en las cavidades de la máquina mediante el aprovechamiento de parte de la energía contenida en el aire caliente, por lo tanto, la energía que se recupera del aire de extracción es igual a la energía ganada por el aire que está siendo insuflado. Si se realiza un balance de energía en el recuperador se obtiene que:

$$\dot{Q}_{RECUP} = \frac{\dot{m}_{vent}}{N} \left((C_{pa} T_s + \omega_o h_{g,s}) - (C_{pa} T_e + \omega_o h_{g,e}) \right) \quad (\text{Ecuación 6.42})$$

Donde:

\dot{Q}_{RECUP} : Calor recuperado [KW].

\dot{m}_{vent} : Masa de aire que es insuflada en la campana.

N : Número de unidades encargadas de insuflar el aire en cada sección de secado.

El término N se refiere a la cantidad de unidades de ventilación encargadas del suministro de aire en cada una de las secciones de secado de la MP-4 de PROPAL S.A. (la cantidad de unidades y su distribución se mencionó anteriormente). En la tabla 7 se muestran los valores de masa de aire por unidad de ventilación, estos datos sirven si se desea omitir los cálculos que conllevaría el método aquí descrito.

La ecuación anteriormente descrita, se aplica indistintamente para cada unidad de ventilación y para aplicarla se debe medir tanto la temperatura del aire a la entrada del recuperador como la temperatura del aire después del precalentamiento, estos valores se toman de la tabla 8. Los términos $h_{g,e}$ y $h_{g,s}$ se obtienen de la ecuación 5.2 reemplazando el valor de la presión (P_v) por el valor de la presión de saturación del vapor a la temperatura del aire en el estado especificado.

✓ **Energía perdida en el aire de extracción después del intercambio térmico con el aire fresco.** Debido a la transferencia de calor del aire caliente (aire extraído de la campana) hacia el aire fresco, cierta cantidad del vapor de agua que contiene el aire, se condensa; sin embargo, esta se desprecia, pues medir dicha cantidad resulta ser una tarea difícil, (se observa poca condensación en los recuperadores y en algunas ocasiones ausencia de esta), bajo esta suposición la cantidad de aire extraído (mezcla aire-vapor) es constante.

$$\dot{Q}_{P,EXT} = \frac{\dot{m}_{EXT}}{N} \left(h_s - (C_{pa} T_{AMB} + \omega h_{g,AMB}) \right) \quad (\text{Ecuación 6.43})$$

Donde:

$\dot{Q}_{P,EXT}$: Energía contenida en le aire de extracción después del intercambio térmico [KW].

\dot{m}_{EXT} : Masa de aire total extraída de la campana de cada sección (pre-sequería y pos-sequería) [Kg/s].

N : Número de unidades encargadas de la extracción del aire en cada sección de secado.

h_s : Energía que contiene el aire después del intercambio [KJ/Kg Aire].

$h_{g,AMB}$: Entalpía del vapor de agua en el aire a la temperatura ambiente [KJ/Kg].

T_{AMB} : Temperatura ambiente [°C].

En la tabla 4 se muestran los valores del caudal en cada unidad de extracción, estos se deben tener en cuenta si se desea evitar realizar cálculos de cantidad de aire que se debe extraer de la campana por medio del método descrito en este trabajo, de igual forma son muy útiles al momento de hacer comparaciones.

El término $Q_{P, EXT}$ es la energía contenida en el aire de extracción después de ceder su calor para el calentamiento del aire fresco. Esta energía representa una pérdida, pues el aire es desechado al ambiente después del proceso.

Como el calor recuperado es igual al calor que cede el aire caliente durante el intercambio térmico, la energía (entalpía) del aire de extracción después del intercambio de calor de la ecuación 6.43, se puede calcular como:

$$h_s = (C_{pa} T_e + \omega h_{g,e}) - \frac{\dot{Q}_{RECUP}^* N}{\dot{m}_{EXT}} \quad (\text{Ecuación 6.44})$$

Donde:

T_e : Temperatura del aire que es extraído justo antes del intercambio [°C].

$h_{g,e}$: Entalpía del aire que es extraído antes del intercambio [KJ/Kg].

La ecuación 6.44 no es aplicable cuando la temperatura T_s es conocida, como en el caso de los extractores sin sistema de recuperación, en estos la temperatura se puede medir fácilmente y la ecuación 6.43 puede ser aplicada directamente.

✓ **Energía necesaria para el calentamiento del aire fresco que se introduce por aberturas en la campana (Hood).** La cantidad de energía a la que se hace mención representa una pérdida del sistema.

$$\dot{Q}_{CALENT,AMB} = \dot{m}_{AMB} \left((C_{pa} T_s + \omega_o h_{g,s}) - (C_{pa} T_e + \omega_o h_{g,AMB}) \right) \quad (\text{Ecuación 6.45})$$

Donde:

$\dot{Q}_{CALENT,AMB}$: Calor necesario para el calentamiento del aire fresco que se introduce por aberturas en la campana (Hood)

$h_{g,s}$: Entalpía del vapor de agua a la temperatura del aire en el interior de la campana [KJ/Kg].

✓ **Energía necesaria para el calentamiento del aire en los intercambiadores de calor que operan con vapor.** La ecuación que se presenta se obtiene mediante un balance de energía en el intercambiador en cuestión, la cual se utiliza para determinar la cantidad de energía necesaria para el calentamiento del aire, en casos donde se usa el vapor como fluido caliente; con la salvedad de que si el tipo de vapor usado en el intercambiador de calor es vapor flash, la energía será considerada energía recuperada en el proceso.

$$\dot{Q}_{CALENT} = \dot{m}_{vent,i} \left((C_{pa} T_s + \omega_o h_{g,s}) - (C_{pa} T_e + \omega_o h_{g,e}) \right) \quad (\text{Ecuación 6.46})$$

Donde:

\dot{Q}_{CALENT} : Calor necesario para el calentamiento del aire [KW].

Como el calor tomado por el aire durante el calentamiento es igual al calor cedido por el vapor durante su condensación, la cantidad de vapor usado en este proceso se calcula como:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \frac{\dot{Q}_{\text{CALENT}}}{(h_g - h_f)} \quad (\text{Ecuación 6.47})$$

Donde:

\dot{m}_{vapor} : Cantidad de vapor requerido para el calentamiento [Kg/s].

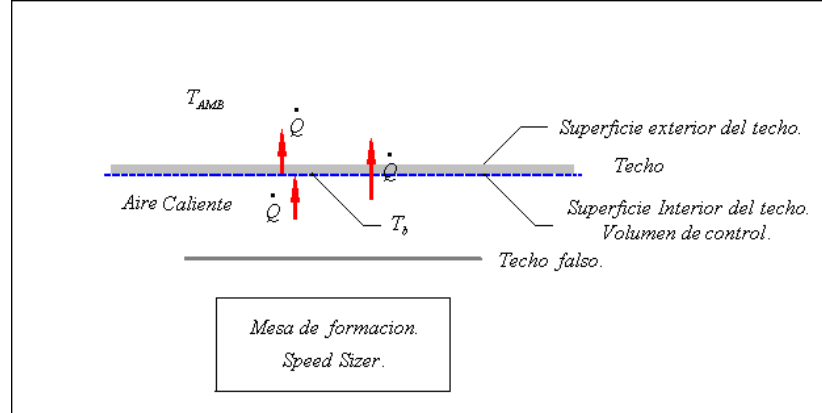
Los valores de h_g y h_f se calculan reemplazando la presión de operación del intercambiador analizado, en la ecuación 5.2 y 5.1 respectivamente. Los valores de T_e , T_s y la presión de operación de los intercambiadores de calor mencionados se encuentran en la tabla 8. Cuando el intercambiador opera con vapor flash como fluido más caliente, la presión de operación de este es la presión en el tanque flash, donde este vapor es producido. El vapor total usado para el calentamiento es la suma del vapor usado en cada unidad de calentamiento.

✓ **Energía necesaria para el calentamiento del aire bajo techo.** el equipo encargado para el calentamiento del aire utilizado en este proceso es un intercambiador de calor, el cual opera con vapor vivo como fluido caliente; por lo tanto, para calcular la energía y el vapor consumido en este proceso basta con utilizar las ecuaciones 6.46 y 6.47 respectivamente; sin embargo, la temperatura a la cual se debe llevar el aire (T_s) es una variable desconocida pues depende de las condiciones de temperatura y humedad del aire en el interior y en el exterior del edificio.

- **Suposiciones.** se trata el techo como una superficie totalmente plana, la temperatura en cualquier punto del techo es la misma (superficie isotérmica), la temperatura en la superficie interna del techo debe ser mayor que la temperatura de punto de rocío del aire en el interior del edificio, el aire en el interior del edificio esta quieto y la conductividad térmica del techo es constante.

El volumen de control para el techo y los respectivos balances de energía se muestran a continuación:

Figura 35. Volumen de Control Techo



La transferencia de calor total desde el aire caliente hacia la superficie externa del techo es:

$$\dot{Q}_{EDIF} = 1.8 * U_{GLOBAL} A_{TECHO} (T_{EDIF} - T_{AMB}) \quad (\text{Ecuación 6.48})$$

$$U_{GLOBAL} = \frac{1}{\frac{1}{h_{Int}} + R_{TECHO} + \frac{1}{h_{Ext}}} \quad (\text{Ecuación 6.49})$$

Donde:

A_{TECHO} : Área del techo [m^2].

U_{GLOBAL} : Coeficiente global de transferencia de calor [$Btu/hr \text{ pie}^2 \text{ } ^\circ F$].

R_{TECHO} : Resistencia térmica del techo (valor típico $4.9 \text{ [hr pie}^2 \text{ } ^\circ F / \text{Btu pulg)]}$).

h_{Int} : Coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del edificio [$Btu/hr \text{ pie}^2 \text{ } ^\circ F$].

h_{Ext} : Coeficiente de transferencia de calor por convección en el exterior del edificio [$Btu/hr \text{ pie}^2 \text{ } ^\circ F$].

C. Earl Libby da un valor para el coeficiente convectivo interno de $1.46 \text{ Btu/hr pie}^2 \text{ } ^\circ F$ basado en aire quieto y para el aire sobre la superficie externa del techo de $4 \text{ Btu/hr pie}^2 \text{ } ^\circ F$, estos valores incluyen los efectos de la radiación. Si las

condiciones del aire en la superficie externa del techo son tranquilas (baja velocidad del viento) se puede trabajar con el coeficiente convectivo interno tanto en la superficie externa como en la interna.

El flujo de energía desde el aire caliente hacia la superficie interna del techo es:

$$\dot{Q}_{EDIF} = 1.8 * h_{Int} A_{TECHO} (T_{EDIF} - T_{PR}) \quad (Ecuación 6.50)$$

Donde:

T_{PR} : Temperatura punto de rocío [$^{\circ}C$].

De la ecuación 6.48, 6.49 y 6.50 se tiene:

$$T_{EDIF} = \frac{T_{PR} - \left(\frac{U_{GLOBAL} * T_{AMB}}{h_{Int}} \right)}{\left(1 - \frac{U_{GLOBAL}}{h_{Int}} \right)} [^{\circ}C] \quad (Ecuación 6.51)$$

Este análisis también puede ser aplicado en el interior de la campana para determinar la temperatura mínima requerida del aire en el Hood, y así evitar la condensación en el techo del mismo; para esto se debe conocer la temperatura de bulbo húmedo del aire en el Hood y reemplazar el valor de la resistencia térmica del techo de la campana, dado en el capítulo 5 en la ecuación 6.49; los valores de los coeficientes para la transferencia de calor por convección tanto en el interior como en el exterior de la campana, se calculan bajo la suposición de que la convección es natural, y se debe calcular haciendo uso de las correlaciones existentes para la convección natural en superficies planas horizontales. A menos que se haga uso de los valores típicos para la convección dados anteriormente.

6.2.8 Pérdidas de calor en superficies.

✓ **Pérdidas en el Hood.** Las pérdidas de calor por las superficies de la campana son debidas a la radiación y a la convección libre o natural. Cada campana consta de una superficie plana horizontal (techo) y cuatro superficies planas verticales (fachada). Las dimensiones de cada una de estas se dieron en la tabla 3.

Para calcular los coeficientes de transferencia de calor por convección en una superficie plana horizontal como es el caso del techo de la campana, se aplican las ecuaciones 5.36 y 5.40 o 5.41. Para la fachada se usa la correlación para la

convección natural sobre una placa vertical, ecuaciones 5.36 y 5.39. El coeficiente de transferencia de calor por radiación se calcula con las ecuaciones 5.47 y 5.48 el calor total perdido por las superficies de cada campana se calcula como:

$$\dot{Q}_{P,CAMP} = \frac{[(h_{RAD} + h_{FACHADA})A_{FACHADA} + (h_{RAD} + h_{TECHO})A_{TECHO}](T_{SUP} - T_{ALRED})}{1000}$$

(Ecuación 6.52)

Donde:

$\dot{Q}_{P,CAMP}$: Calor perdido en cada campana [W].

h_{TECHO} : Coeficiente de transferencia de calor por convección sobre una placa horizontal (techo) [W/m²°C].

$h_{FACHADA}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección sobre una placa vertical (fachada) [W/m²°C].

h_{RAD} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación [W/m²°C].

$A_{FACHADA}$: Área de las paredes (fachada) [m²].

A_{TECHO} : Área del techo [m²].

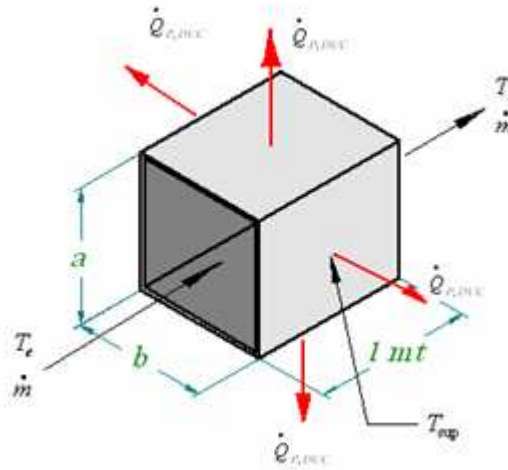
T_{SUP} : Temperatura de la superficie [°C].

T_{AMB} : Temperatura del aire en el interior del edificio [°C].

✓ **Pérdidas de calor en ductos rectangulares.** Se calculan por metro de longitud del ducto. El método consiste básicamente en determinar las pérdidas de calor por convección y radiación sobre cada superficie por separado.

Para los casos en los que se requiera conocer las pérdidas de calor sobre las superficies aisladas, bastará con suponer una temperatura superficial y realizar un proceso de cálculo de *n-iteraciones*.

Figura 36. Ducto.



- ❖ Cálculo de los coeficientes de convección natural y forzada.

Los coeficientes de transferencia de calor por convección natural y forzada para las superficies del ducto, se deben calcular para cada una de ellas por separado, de esta manera se deben encontrar cuatro coeficientes combinados de convección. El coeficiente de transferencia de calor por convección combinada se debe calcular con las ecuaciones 5.36 a 5.42.

- ❖ Cálculo del coeficiente de transferencia de calor debida a la radiación.

Se obtiene de las ecuaciones 5.47 y 5.48 como:

- ❖ Cálculo del flujo de calor perdido.

Es la suma del calor perdido por cada superficie.

$$\dot{Q}_{P,DUCT} = (h_{COMB,1}A_1 + h_{COMB,2}A_2 + h_{COMB,3}A_3 + h_{COMB,4}A_4 + h_{RAD}A_{EXT})(T_{SUP} - T_{AMB})$$

(Ecuación 6.53)

Donde:

Área superficial de las superficies dispuestas horizontalmente.

$$A_1 = A_2 = (b + (2 * esp)) * Long \quad (Ecuación 6.54)$$

Área superficial de las superficies dispuestas verticalmente.

$$A_3 = A_4 = (a + (2 * esp)) * Long \quad (Ecuación 6.55)$$

a : Ancho del ducto [m].

b : Altura del ducto [m].

$Long$: Longitud del ducto [m].

esp : Espesor del aislamiento [m].

Área superficial externa del ducto [m²].

$$A_{EXT} = P_{EXT} * Long \quad (Ecuación 6.56)$$

Perímetro externo del ducto [m].

$$P_{EXT} = (2 * (a + b)) + (8 * esp) \quad (Ecuación 6.57)$$

$h_{COMB,1}$: Coeficiente combinado de transferencia de calor por convección (superficie horizontal lado caliente hacia arriba).

$h_{COMB,2}$: Coeficiente combinado de transferencia de calor por convección (superficie horizontal lado caliente hacia abajo).

$h_{COMB,3}$: Coeficiente combinado de transferencia de calor por convección (superficie vertical).

$h_{COMB,4}$: Coeficiente combinado de transferencia de calor por convección (superficie vertical).

El flujo de calor por unidad de longitud del ducto es:

$$\dot{q}_{P,DUCT} = \frac{\dot{Q}_{P,DUCT}}{Long}$$

$$\dot{q}_{P,DUCT} = ((h_{COMB,1} + h_{COMB,2})(b + (2 * esp)) + (h_{COMB,3} + h_{COMB,4})(a + (2 * esp)) + h_{RAD} P_{EXT})(T_{SUP} - T_{AMB}) \quad (Ecuación 6.58)$$

Donde:

$\dot{q}_{P,DUCT}$: Calor perdido en el ducto por unidad de longitud [W/m].

T_{SUP} : Temperatura superficial del ducto [$^{\circ}\text{C}$].

❖ Cálculo de la resistencia térmica del aislamiento del ducto.

Para ductos aislados la resistencia térmica de conducción se puede calcular aproximadamente como:

$$R_{COND} = \frac{esp}{k_{AIS} * Long (P_{EXT} - (13.84 * esp))} \quad (Ecuacion\ 6.59)$$

Donde:

R_{COND} : Resistencia a la conducción del aislamiento térmico [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$].

Para ductos desnudos $R_{COND} = 0$.

k_{AIS} : Conductividad térmica del aislamiento [$\text{W}/\text{m K}$].

❖ Verificación de la temperatura de superficie.

$$T_{CALC} = T_{SUP} - \left(\dot{Q}_{P,DUCT} * R_{COND} \right) \quad (Ecuacion\ 6.60)$$

Donde:

T_{SP} : Temperatura superficial supuesta [$^{\circ}\text{C}$].

Si el valor absoluto de la diferencia entre la temperatura de superficie (T_{CALC}) y la temperatura de la superficie supuesta (T_{SP}) es menor o igual a 0.1°C , entonces, el calor perdido es $\dot{q}_{P,DUCT}$ y la temperatura de la superficie es la que se supuso (T_{SP}) sino hacer $T_{SP} = T_{CALC}$ y volver al primer punto del procedimiento.

✓ **Pérdidas de calor en tuberías.** Para aplicar este procedimiento se requiere conocer el valor de la temperatura de operación del fluido transportado, su velocidad, la temperatura ambiente, los materiales del sistema y sus dimensiones. En ausencia de la temperatura de operación del fluido en el interior de la tubería, se debe conocer la temperatura de la superficie de la misma.

- ❖ Cálculo de los coeficientes de convección natural y forzada sobre la superficie.

Si la temperatura de la superficie del ducto o la temperatura de la superficie de la chaqueta del aislamiento del ducto no es conocida, se debe suponer una temperatura (T_{SP}); por otro lado, cuando la temperatura superficial ha sido medida la pérdida de calor por unidad de longitud se calcula siguiendo los pasos del procedimiento sin necesidad de realizar las iteraciones necesarias cuando este no es el caso.

Los coeficientes de transferencia de calor por convección natural y forzada, se calculan con las ecuaciones 5.36, 5.43 y 5.44.

- ❖ Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación.

Se obtiene de las ecuaciones 5.47 y 5.48.

- ❖ Cálculo del coeficiente de transferencia de calor total.

$$h_{TOT} = h_{COMB} + h_{RAD} \quad (Ecuacion\ 6.61)$$

- ❖ Cálculo del coeficiente de convección interna forzada.

El coeficiente para la convección interna forzada se calcula con la ecuación 5.45. Para aplicarla se necesita conocer: el diámetro de la tubería, el flujo másico del fluido en el interior del tubo y la temperatura del fluido; en ocasiones no se puede decir con certeza cuanto es el flujo másico que circula por la tubería, por lo tanto es imposible determinar la velocidad del fluido, en estos casos se pueden realizar los cálculos basados en los valores de velocidades recomendados por SPIRAX SARCO.

- Para el vapor saturado la velocidad en líneas principales suele estar en el rango entre 25 y 35 m/s.
- Para el vapor saturado la velocidad en derivaciones o ramales suele ser de 20 a 25 m/s.
- Para vapor sobrecalentado las velocidades suelen estar entre 40 y 60 m/s.
- En tuberías de retorno de condensados con vapor flash la velocidad suele estar entre 20 y 30 m/s

- En tuberías de retorno de condensado sin vapor flash la velocidad suele estar entre 1 y 4 m/s.

❖ Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor referido al área exterior.

$$U = \frac{1}{\frac{(D_{EXT} + (2 * esp))}{D_{INT} h_{INT}} + (D_{EXT} + (2 * esp))R_{COND} + (D_{EXT} + (2 * esp))R_{COND,AIS} + \frac{1}{h_{TOT}}}$$

(Ecuación 6.62)

R_{COND} : Resistencia térmica a la conducción del tubo.

$R_{COND,AIS}$: Resistencia térmica a la conducción del aislamiento.

Si el tubo se encuentra desnudo y se desea calcular las pérdidas de calor y la temperatura de la superficie, hacer $R_{COND,AIS} = 0$ y $esp = 0$.

La resistencia térmica a la conducción para el tubo:

$$R_{COND} = \frac{\ln\left(\frac{D_{EXT}}{D_{INT}}\right)}{2 * k} \quad (Ecuación 6.63)$$

La resistencia térmica a la conducción para el aislamiento:

$$R_{COND,AIS} = \frac{\ln\left(\frac{(D_{EXT} + (2 * esp))}{D_{EXT}}\right)}{2 * k_{AIS}} \quad (Ecuación 6.64)$$

Donde:

D_{EXT} : Diámetro externo de la tubería [m].

D_{INT} : Diámetro interno de la tubería [m].

esp : Espesor del aislamiento [m].

k : Conductividad térmica del material de la tubería [W/m K].

k_{AIS} : Conductividad térmica del aislamiento [W/m K].

❖ Cálculo del flujo de calor.

$$\dot{q}_{P,TUBER,A} = U(T_{OP} - T_{AMB}) \quad (Ecuación 6.65)$$

$$\dot{q}_{P,TUBER,L} = U(\pi(D_{EXT} + (2 * esp)))(T_{OP} - T_{AMB}) \quad (Ecuación 6.66)$$

❖ Verificación de la temperatura de superficie.

$$T_{SUP} = T_{OP} - \left[\dot{q}_{P,TUBER,A} (D_{EXT} + (2 * esp)) \left(\frac{1}{D_{INT} h_{F,INT}} + R_{COND} + R_{COND,AIS} \right) \right] \quad (Ecuación 6.67)$$

Donde:

$\dot{q}_{P,TUBER,A}$: Flujo de calor perdido por unidad de área superficial [m²].

$\dot{q}_{P,TUBER,L}$: Flujo de calor perdido por unidad de longitud [m].

T_{OP} : Temperatura del fluido en el interior de la tubería [°C].

T_{SUP} : Temperatura de la superficie [°C].

Si el valor absoluto de la diferencia entre la temperatura de superficie (T_{SUP}) y la temperatura de la superficie supuesta (T_{SP}) es menor o igual a 0.1 °C, entonces, el calor perdido es $\dot{q}_{P,TUBER}$ y la temperatura de la superficie es la que se supuso (T_{SP}) sino hacer $T_{SP} = T_{SUP}$ y volver al inicio del procedimiento.

6.2.9 Pérdidas de calor debidas a fugas de vapor. Es el problema más común y el que genera más altas pérdidas monetarias, pues el costo de este depende un 85% del precio del combustible usado en la caldera, el 15% restante es debido al costo del tratamiento del agua de alimentación, entre otros. Este problema se

puede corregir fácilmente pues en la mayoría de los casos las reparaciones son sólo labores de mantenimiento.

El parámetro más importante para determinar la cantidad de vapor que se fuga en una línea, es el diámetro aproximado del orificio por el cual el vapor esta escapando, una vez se tiene dicho valor la masa de vapor se calcula como:

$$\dot{m}_{FUGA} = \left(\frac{\pi (D_{ORIFICIO})^2}{617.4} \right) ((14.51 * P) + 14.7) \quad (\text{Ecuación 6.68})$$

La energía perdida con el vapor es:

$$\dot{Q}_{P,FUGA} = \dot{m}_{FUGA} * (h_{VAPOR} - h_{AGUA,A}) \quad (\text{Ecuación 6.69})$$

Donde:

\dot{m}_{FUGA} : Masa de vapor fugado [Kg/s].

$D_{ORIFICIO}$: Diámetro del orificio de la fuga [pulg].

P : Presión del vapor en la línea [Barg].

h_{VAPOR} : Entalpía del vapor [KJ/Kg °C]. Se obtiene de la ecuación 6.18 con la presión en la línea en pascales.

$h_{AGUA,A}$: Entalpía del agua de alimentación [KJ/Kg °C].

La entalpía del agua de alimentación es aproximadamente:

$$h_{AGUA,A} = 4.21 * T_{COND} \quad (\text{Ecuación 6.70})$$

T_{COND} : Temperatura del agua de alimentación (o temperatura recuperación de condensados) [°C].

6.2.10 Eficiencia del proceso.

$$\eta = \frac{\text{Energía Aprovechada}}{\text{Energía Suministrada}}$$

$$\text{Energía Aprovechada} = \text{Energía Suministrada} - \text{Pérdidas}$$

$$\eta = 1 - \frac{\text{Pérdidas}}{\text{Energía Suministrada}} \quad (\text{Ecuación 6.71})$$

Donde las pérdidas son iguales a la suma de las pérdidas de calor por tuberías, fugas, Hood, por calentamiento del aire que se introduce por espacios abiertos en el Hood, calor no aprovechado del aire de extracción, entre otras; y la energía suministrada es la energía total usada en el proceso, tales como: energía transferida al papel por los cilindros secadores, energía para el calentamiento del aire que se insufla en la campana, para calentamiento del aire que se sopla bajo techo y para el calentamiento del aire de los equipos que componen la sección de secado.

6.2.11 Costo de la energía. En PROPAL S.A. la generación de vapor se lleva acabo en una caldera acuotubular, en la cual se usa como combustible una mezcla de polvillo de bagazo y carbón, el cual a su vez es una mezcla de carbón proveniente de Antioquia, Cundinamarca y Valle del Cauca.

Los datos a continuación fueron proporcionados por el personal de cuartos de control calderas.

Generación	110 Ton/hr
Presión en el domo	65.8 barg
Temperatura del vapor sobrecalentado	450 °C
Temperatura del agua de alimentación (Recuperación de condensados)	126 °C
Temperatura del agua de alimentación a la salida del economizador	172 °C
Consumo de Carbón	330 Ton/día
Consumo de polvillo de bagazo	120 Ton/día
Poder calorífico del carbón	26266 KJ/Kg
Poder calorífico del bagazo	10460 KJ/Kg

Precio del carbón (2006)	120 pesos/Kg
Precio del Bagazo (2006)	40 pesos/Kg
Eficiencia de la Caldera	82%

$$\frac{\text{Costo}}{\text{año}} = \frac{3600 * \dot{Q}_{\text{CONSUMIDO}}}{\eta_{\text{CALDERA}}} * \left[\frac{\text{precio combustible}}{PC_{\text{COMB}}} \right] * \frac{\text{Horas Operacion}}{\text{año}} \quad (\text{Ecuación 6.72})$$

Donde:

PC_{COMB} : Poder calorífico del combustible [KJ/Kg].

Cuando el combustible quemado en la caldera es una mezcla de dos o más combustibles, el precio y el poder calorífico de cada uno debe ser afectado por la relación de gasto de masa de cada combustible; luego la ecuación 6.72 puede ser aplicada.

7. PROGRAMA

El programa tiene como función, la resolución numérica de las ecuaciones para el cálculo de los requerimientos de energía térmica en el proceso de secado de papel, las pérdidas de calor por superficies, las pérdidas de calor debidas a fugas de vapor, entre otros.

Para esto se ha implementado una serie de funciones para el cálculo de las propiedades termodinámicas del vapor saturado, el agua saturada y el aire seco.

Los rangos de temperaturas para la propiedades termodinámicas del vapor saturado seco y el agua son de 0.01 °C a 360 °C y para el aire seco de -20 °C a 2000 °C. El programa solo recibe datos digitados por el usuario en unidades del sistema internacional (SI); por lo tanto, antes de hacer uso de este programa debe estar seguro de que todos los datos de los que se dispone estén en unidades del sistema internacional.

7.1 INSTALACION DEL PROGRAMA

- ❖ Introduzca el CD-ROM en la unidad de lectura de su ordenador.



- ❖ Haga doble clic sobre el icono Mi PC.



Unidad (E:)

- ❖ Haga doble clic sobre el icono Unidad de CD-ROM.



Produccion.exe

- ❖ Haga clic con el botón derecho del mouse (ratón) sobre el icono Produccion.exe, luego seleccione la opción copiar.

- ❖ Con el botón derecho del Mouse (ratón) haga clic derecho sobre el escritorio y seleccione la opción pegar.



PROGRAMA
MP-4

- ❖ Con el botón derecho del Mouse haga clic sobre la carpeta PROGRAMA MP-4 y seleccione la opción copiar.

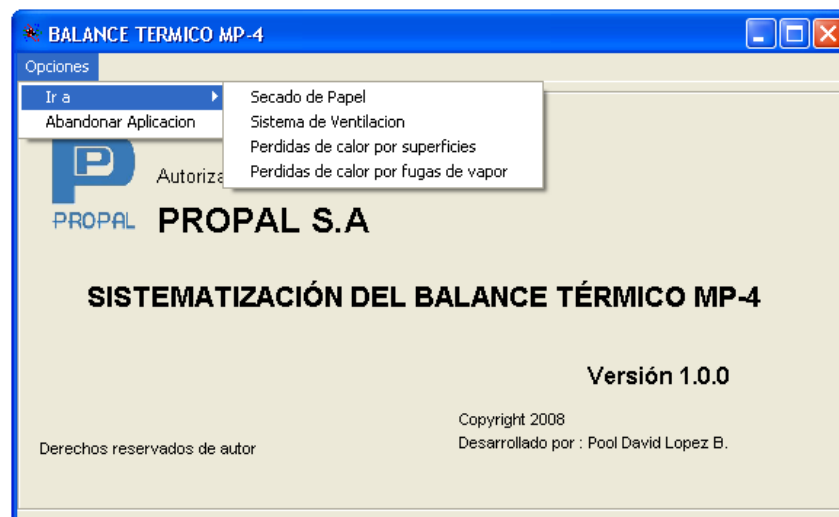
- ❖ En el disco local (C:) haga clic con el botón derecho del Mouse y seleccione la opción pegar.

7.2 MANEJO DEL PROGRAMA



Para iniciar el programa, hágase doble clic sobre el icono del programa que se muestra arriba de este párrafo. El programa inicia mostrando una ventana de diálogo en la cual se muestra el tema tratado, el número de versión, etcétera, desde esta ventana se accede a todas las funciones del programa por medio del menú desplegable **OPCIONES**. A continuación se presenta una breve descripción de sus funciones. (Ver figura 37).

Figura 37. Ventana de diálogo.



El menú **OPCIONES** está conformado por el sub-menú (**IR A**), para la selección de la aplicación que se desea ejecutar y el comando para salir o cerrar el programa (**ABANDONAR APLICACION**).

El sub menú **IR A** está compuesto por tres comandos para la selección de la aplicación que se desee usar como: el comando **SECADO DE PAPEL**, **SISTEMA DE VENTILACION**, **PERDIDA DE CALOR POR SUPERFICIES** y el comando **PERDIDAS DE CALOR POR FUGAS DE VAPOR**.

7.2.1 Comando secado de papel. El comando **SECADO DE PAPEL** abre la ventana **DATOS GENERALES DE PRODUCCION**, esta consta de una serie de campos de entrada los cuales reciben datos de producción como velocidad de operación de la máquina, peso del papel, ancho del papel, entre otros; los cuales deben ser digitados por el usuario; cada campo de entrada está equipado con un comentario o información acerca de las variables como nombre, unidades, etcétera, que debe ser digitada en el campo; dicha información, es visible siempre que el cursor esté ubicado sobre dicho campo. (Ver figura 38).

Figura 38. Ventana datos generales de producción.

The screenshot shows a software window titled "DATOS GENERALES DE PRODUCCION". Inside, there is a grid of input fields. A yellow box highlights the main input area, with labels pointing to "NOMBRE DE LA VARIABLE" (pointing to the top of the grid), "CAMPOS DE ENTRADA" (pointing to the input fields), and "BOTONES DE ACCION" (pointing to the bottom buttons). The input fields are organized as follows:

Variable Name	Unit / Info	Variable Name	Unit / Info
Velocidad		hcont(0)	
	Velocidad de Operación [m/min]		
Peso (gr)		hcont(i)	
Constante CPF		Conductividad K	
Diámetro Secador			
Patm			
Longitud Camisa			
Ancho			

At the bottom of the window, there are three buttons: "Continuar", "Limpiar", and "Salir".

En algunas ocasiones se requiere el ingreso de datos de manejo poco comunes, para algunas personas, como el calor específico de las fibras del papel, la conductividad térmica de la camisa del secador y los coeficientes para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por contacto $h_{CONT(0)}$ y $h_{CONT(i)}$; en estos casos, el comentario del campo de entrada contiene información acerca de los valores típicos para estas variables. (Ver figura 39).

Figura 39. Comentario de campo de entrada.

The screenshot shows a software window titled "DATOS GENERALES DE PRODUCCION". Inside, there is a grid of input fields. On the left, there are seven fields: "Velocidad", "Peso (gr)", "Constante CPF", "Diámetro Secador", "Patm", "Longitud Camisa", and "Ancho". On the right, there are three fields: "hcont(0)", "hcont(i)", and "Conductividad K". A tooltip is visible over the "hcont(i)" field, displaying the text: "Coeficiente para el calculo del coeficiente de transferencia de calor por contacto (955 W/m^2 C)". At the bottom of the window, there are three buttons: "Continuar", "Limpiar", and "Salir". The background of the window shows a faint image of an industrial facility.

Esta ventana, también contiene tres botones de acción y el usuario puede interactuar con ellos simplemente haciendo clic sobre los mismos.

Salir

El botón **SALIR** cierra la ventana y despliega la ventana de diálogo inicial mostrada en la figura 37.

Limpiar

El botón **LIMPIAR** borra toda la información que se halla introducido en los campos de entrada.

Continuar

El botón **CONTINUAR** asigna los valores digitados por el usuario a las respectivas variables internas del programa, a la vez que despliega la ventana **SECADO DE PAPEL**. (Ver figura 40).

En la ventana **SECADO DE PAPEL**, el usuario además de llenar los campos de entrada solicitados (presión de operación de cada grupo de cilindros secadores, número de cilindros secadores activos (en contacto directo con el papel), temperatura del papel al inicio y al final de cada grupo, temperatura del aire, factor de contacto, calibración del sifón, presión diferencial, velocidad del aire en los bolsillos, espesor de la camisa de los cilindros secadores, humedad del papel, entre otros) debe llenar los valores pedidos por medio de cajas de entrada

volátiles (Ver figura 41) las cuales aparecen cada vez que el usuario hace clic sobre los cuadros G-1, G-2, G-3, G-4, G-5, G-5A y G-6, que representan los grupos de cilindros secadores. El usuario no debe olvidar hacer clic sobre estos cuadros, pues el programa asignará a las variables internas valores de cero (0) mostrando resultados erróneos.

Figura 40. Ventana secado de papel.

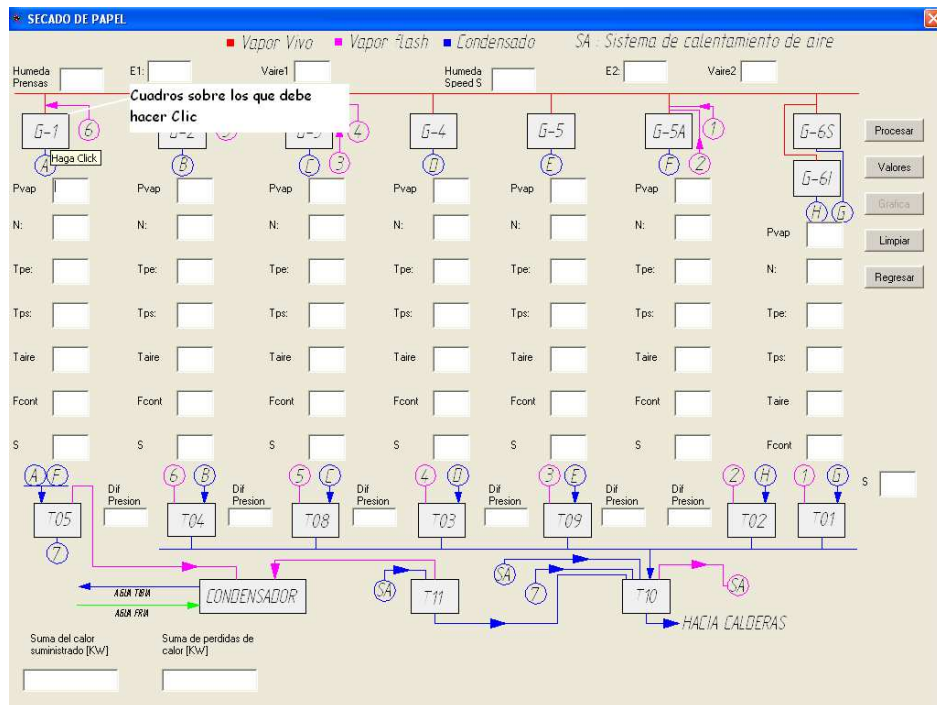


Figura 41. Caja de entrada volátil

La ventana **SECADO DE PAPEL** está compuesta por cinco botones de acción con las siguientes funciones.

Limpiar

El botón **LIMPIAR** borra todos los datos que han sido introducidos por el usuario.

Regresar

El botón **REGRESAR** cierra la ventana secado de papel y muestra la ventana datos generales de producción.

Procesar

El botón **PROCESAR** asigna los valores digitados a las variables internas del programa y resuelve las ecuaciones involucradas en este proceso. Cuando el usuario hace clic sobre este botón aparece una barra de progreso (Ver figura 42) que indica el avance de la resolución. Cada vez que el programa calcula la humedad; dicho valor se muestra por medio de una ventana volátil. (Ver figura 43).

Figura 42. Ventana de secado de papel (barra de progreso visible)

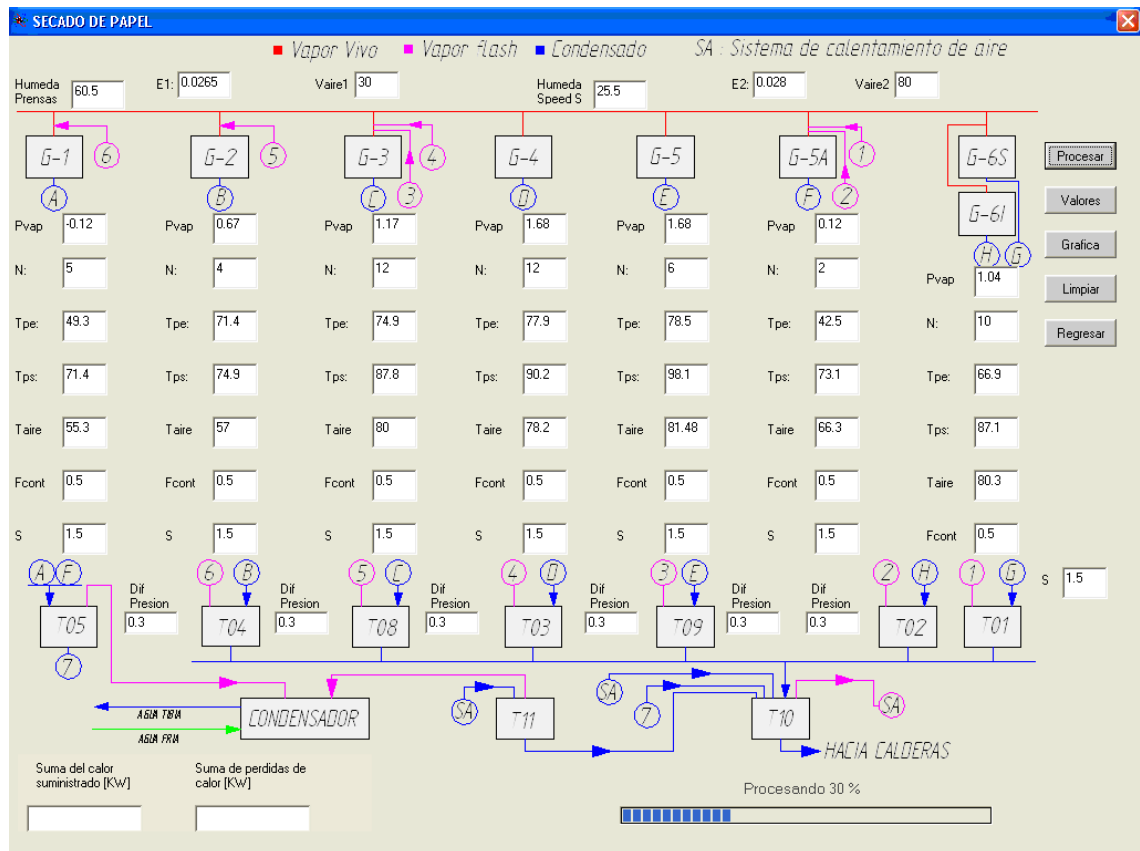
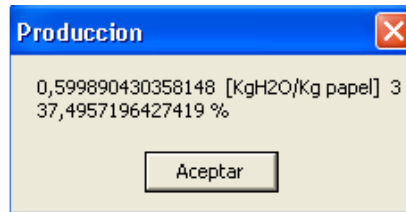


Figura 43. Ventana volátil



La ventana volátil muestra los valores de humedad del papel por unidad de masa y en forma de porcentaje, valor superior e inferior respectivamente. Haga clic en aceptar para que el programa continúe calculando los valores restantes.



El botón **VALORES** muestra los valores calculados en la ventana **RESULTADOS**.



El botón **GRAFICA** es una opción que permite realizar una curva de evaporación graficando los valores de humedad específica del papel. Esta acción no está habilitada en esta versión del programa.

La ventana **RESULTADOS** (Ver figura 44) está compuesta por campos de salida, los cuales difieren de los campos de entrada, pues los primeros están bloqueados contra escritura.

La ventana resultados contiene los resultados de los cálculos realizados, tales como: calor transferido al papel, pérdidas de calor por las superficies del cilindro secador, consumos de vapor vivo en los cilindros secadores, cantidad de condensado drenado de los cilindros secadores, cantidad de agua evaporada en cada sección, rata de evaporación, economía de vapor (masa de vapor usado por masa de agua evaporada), entre otros.

Figura 44. Ventana resultados

RESULTADOS

Opciones: **Otros resultados** | Costo energía

papel

Perdidas de calor en los cilindros secadores		Consumo de Vapor Vivo		Consumo de vapor (Vapor Vivo + Vapor Flash)	
Q - Grupo 1	3523,657	Vapor Vivo Grupo 1	1,660	Vapor Grupo 1	1,674
Q - Grupo 2	2537,637	Vapor Vivo Grupo 2	1,235	Vapor Grupo 2	1,267
Q - Grupo 3	5462,461	Vapor Vivo Grupo 3	3,061	Vapor Grupo 3	3,066
Q - Grupo 4	4936,944	Vapor Vivo Grupo 4	2,449	Vapor Grupo 4	2,448
Q - Grupo 5	1565,523	Vapor Vivo Grupo 5	0,807	Vapor Grupo 5	0,807
Q - Grupo 5A	924,081	Vapor Vivo Grupo 5A	0,451	Vapor Grupo 5A	0,467
Q - Grupo 6	3175,679	Vapor Vivo Grupo 6	1,698	Vapor Grupo 6	1,698
Q Total	23125,992	Consumo Vapor Vivo	11,363	Vapor Total	11,447

Masa de condensado		Masa de vapor Flash		Datos Generales	
Condensado Grupo 1	1,641	Vapor Flash Grupo 1	0,033	Agua Evap Pre-secado	7,939
Condensado Grupo 2	1,252	Vapor Flash Grupo 2	0,014	Rtato de Evap Pre-secado	47,852
Condensado Grupo 3	3,068	Vapor Flash Grupo 3	0,028	Economía del Vapor Pre-sec	1,161
Condensado Grupo 4	2,430	Vapor Flash Grupo 4	0,019	Agua Evap Post-secado	1,567
Condensado Grupo 5	0,801	Vapor Flash Grupo 5	0,006	Rtato de Evap Post-secado	30,690
Condensado Grupo 5A	0,459	Vapor Flash Grupo 5A	0,007	Economía del Vapor Post-sec	1,371
Condensado Grupo 6	1,681	Vapor Flash Grupo 6	0,016	Eficiencia	92,255
Condensado Total	11,323	Vapor Flash Total	0,124	Eficiencia global	86,857

Humedad del Papel después de Pre-secado: 2,3

Humedad del Papel después de Post-secado: 4,3

Regresar

La ventana resultados cuenta con un menú **OPCIONES** (desplegable bajo la acción del clic) el cual contiene los comandos **OTROS RESULTADOS** y **COSTO ENERGIA**.

El comando **OTROS RESULTADOS** bajo la acción del clic, despliega la ventana de igual nombre.

El comando **COSTO DE LA ENERGIA** despliega la ventana de igual nombre.

Regresar

El botón **REGRESAR** cierra la ventana resultados dejando activa la ventana secado de papel.

La ventana **OTROS RESULTADOS** está compuesta por campos de salida bloqueados contra escritura. Esta ventana contiene los resultados adicionales que no pueden ser mostrados en la ventana resultados tales como: temperatura superficial de los cilindros secadores, coeficientes de transferencia de calor por contacto y coeficiente de película. El botón **REGRESAR** en esta ventana tiene la

misma función que el botón regresar mencionado en el párrafo anterior. (Ver figura 45).

Figura 45. Ventana otros resultados

The screenshot shows a software window titled "OTROS RESULTADOS". It contains two main sections: "Temperatura superficial secadores" and "Coeficientes transferencia de calor".

Temperatura superficial secadores		Coeficientes transferencia de calor			
Grupo 1	86,11	Coef de Condensado	3539,189	Coef Contacto Grupo 6	574,682
Grupo 2	98,89	Coef Contacto Grupo 1	1786,516		
Grupo 3	109,70	Coef Contacto Grupo 2	1609,241		
Grupo 4	119,40	Coef Contacto Grupo 3	1240,534		
Grupo 5	123,46	Coef Contacto Grupo 4	759,805		
Grupo 5A	99,89	Coef Contacto Grupo 5	484,568		
Grupo 6	113,08	Coef Contacto Grupo 5A	716,796		

At the bottom right of the window is a button labeled "Regresar".

La ventana **COSTO DE LA ENERGIA** por medio de la cual se puede calcular los costos de la energía usada en determinado proceso, está conformada por un campo desplegable de selección, cuatro campos de entrada de datos y un campo de salida bloqueado para escritura, en el cual, se muestra el resultado obtenido. (Ver figura 46).

Figura 46. Ventana costo de la energía

The screenshot shows a software window titled "COSTO DE LA ENERGIA". It contains several input fields and a dropdown menu. The dropdown menu, labeled "CAMPO DESPLEGABLE DE SELECCION", is currently open, showing options: "Seleccione", "Carbon", "Bagazo", "ACPM", "Gas", and "Carbon - Bagazo". The "Carbon" option is selected. Other input fields include "Tipo de combustible", "Eficiencia caldera [%]", "Precio del Combustible", "Horas de operacion en el año", "Energia Consumida o da [KW]", and "Costo [Pesos/año]". There are also buttons for "Calcular", "Refrescar", "Borrar", and "Volver".

El **CAMPO DESPLEGABLE DE SELECCIÓN** contiene los tipos de combustible de uso más frecuente en las industrias. Cada vez que el usuario seleccione un tipo de combustible el programa asignará el valor de su poder calorífico internamente para el combustible seleccionado. Cuando el tipo de combustible que se selecciona, es una mezcla de carbón y bagazo de caña aparecerá una ventana volátil llamada **RELACION DE COMBUSTIBLES**, en la cual, el usuario debe digitar cuantas partes de la mezcla son carbón y cuantas partes son bagazo de caña. (Ver figura 47). Adicionalmente en la ventana costo de la energía aparecerá otro campo de entrada para digitar el precio del combustible complementario. (Ver figura 48).

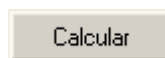
Figura 47. Ventana volátil relación de combustibles.

The screenshot shows a software window titled "RELACION DE COMBUSTIBLES". It contains two input fields: "Partes de carbon" with the value "3" and "Partes de bagazo" with the value "2". There are buttons for "Cargar", "Borrar", and "Volver".

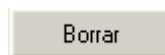
Figura 48. Ventana costo de la energía (campo de entrada adicional)

The screenshot shows a software window titled "COSTO DE LA ENERGIA". It contains several input fields and buttons. A dropdown menu for "Tipo de combustible" is set to "Carbon - Bagazo". To its right, a label "SELECCION MEZCLA" points to the text "CARBON Y BAGAZO". Below these are input fields for "Eficiencia caldera [%]", "Energia Consumida o Perdida [KW]", "Precio del Combustible [Pesos/Kg]", "Costo [Pesos/año]", "Precio Bagazo [Pesos/Kg]", and "Horas de operacion en el año". An arrow points to the "Precio Bagazo" field with the label "CAMPO DE ENTRADA ADICIONAL". At the bottom are four buttons: "Calcular", "Refrescar", "Borrar", and "Volver".

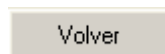
Una vez halla digitado los valores correspondientes en los campos de entrada de la ventana relación de combustibles, haga clic sobre el botón **CARGAR** para introducir los valores digitados en el programa; bajo esta acción la ventana desaparecerá y los datos digitados habrán sido cargados. Cuando se requiera abortar el proceso o cerrar la ventana relación de combustibles haga clic sobre el botón **VOLVER** de la misma ventana.



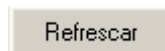
Haga clic sobre el botón **CALCULAR** de la ventana costo de la energía para ver el resultado obtenido.



Haga clic sobre el botón **BORRAR** de la ventana costo de la energía para limpiar tanto los campos de entrada como los de salida. Este botón tiene la misma función en todas las ventanas de este programa, por esta razón de aquí en adelante se omitirá la descripción de la función de este botón en las demás ventanas.



Haga clic sobre el botón **VOLVER** de la ventana costo de la energía para cerrarla.



Haga clic sobre el botón **REFRESCAR** de la ventana costo de la energía siempre que quiera evaluar los resultados con otro tipo de combustible o con otra relación de combustibles.

7.2.2 Comando sistema de ventilación. El comando **SISTEMA DE VENTILACION** abre la ventana **VENTILACION CAMPANA**, la cual contiene siete campos de entrada de datos, los cuales reciben valores de temperatura de bulbo seco y húmedo del aire ambiente, temperatura de bulbo seco y húmedo del aire en cada campana y presión atmosférica, los cuales deben ser digitados por el usuario. Cada campo de entrada está equipado con un comentario o información acerca de la variable nombre, unidades, etcétera, que debe ser digitada en el campo, dicha información, es visible siempre que el cursor está ubicado sobre el campo de entrada.

Esta aplicación requiere de otros valores que deben ser digitados por el usuario a través de cajas de entrada volátiles (como en la figura 41) para esto hágase clic sobre los recuadros en la parte inferior de la ventana, sobre las líneas rojas que representan los diferentes flujos de vapor y sobre cada cuadro de la ventana que representa un intercambiador de calor. (Ver figura 49).

Figura 49. Ventana ventilación campana.

VENTILACION CAMPANA

Opciones

CAMPOS DE SALIDA

Temperatura Ambiente [C]	Humedad absoluta del aire ambiente [KgH2O/Kg Aire]	Calor Recuperado del aire de extraccion [KW]	Calor que se pierde con el aire de extraccion despues de realizar el intercambio [KW]
Temperatura bulbo humedo [C]	Humedad absoluta del aire en el Hood de Pre-secado [KgH2O/Kg Aire]	Calor recuperador del Vapor Flash [KW]	Calor perdido debido al calentamiento del aire que se introduce por aberturas en el Hood [KW]
Presion Atmosferica [Kpa]	Humedad absoluta del aire en el Hood de post-secado [KgH2O/Kg Aire]	Calor cedido por el vapor vivo [KW]	Consumo de Vapor Vivo [Ton/hr]
		Haga Clic para digitar los valores de presion de vapor	

Diagrama de la Ventilación Campana:

Intercambiadores de Calor
Haga Clic para digitar la temperatura del aire a la salida de cada uno de estos

Temperatura del aire en le Hood

Temperatura de bulbo humedo

Humedad final

Humedad 2

Humedad 1

Calcular

Valores por seccion

Salir

Premsas

Recuadros Inf (haga clic para digitar los valores de humedad del papel)

Botones: Borrar, Refrescar Pantalla

Cada vez que el usuario hace clic sobre cada campo e ingresa los valores en las cajas de entrada volátiles aparecerá una figura de color verde que indica al

usuario cuales valores han sido digitados, evitando el reingreso de datos por parte del usuario. (Ver figura 50).

Figura 50. Ventana ventilación campana (señalamiento por medio de figuras verdes)

VENTILACION CAMPANA

Opciones

Temperatura Ambiente [C]	37.8	Humedad absoluta del aire ambiente [KgH2O/Kg Aire]		Calor Recuperado del aire de extraccion [KW]		Calor que se pierde con el aire de extraccion despues de realizar el intercambio [KW]	
Temperatura bulbo humedo [C]	22.1	Humedad absoluta del aire en el Hood de Pre-secado [KgH2O/Kg Aire]		Calor recuperador del Vapor Flash [KW]		Calor perdido debido al calentamiento del aire que se introduce por aberturas en el Hood [KW]	
Presion Atmosferica [Kpa]	90	Humedad absoluta del aire en el Hood de post-secado [KgH2O/Kg Aire]		Calor cedido por el vapor vivo [KW]		Consumo de Vapor Vivo [Ton/hr]	

Temperatura del aire en el Hood: 66

Temperatura de bulbo humedo: 48.9

Humedad final: ☐ Humedad 2: ☐ Humedad 1: ☐

Calcular Valores por seccion Salir Borrar Refrescar Pantalla Prensas

Calcular

Haga clic sobre el botón **CALCULAR** para ver en los campos de salida los resultados obtenidos.

Refrescar Pantalla

Haga clic sobre el botón **REFRESCAR PANTALLA** para ocultar los círculos verdes que aparecieron en la ventana producto del ingreso de datos.

Los botones **SALIR** y **BORRAR** tienen la misma función que los botones con igual nombre descritos anteriormente.

Valores por seccion

Haga clic sobre el botón **VALORES POR SECCION** para desplegar la ventana de igual nombre. En esta ventana se observan los demás resultados que se obtienen para cada sección de secado. (Ver figura 51).

Figura 51. Ventana valores por sección

The screenshot shows a software window titled "VALORES POR SECCION" with a blue title bar and standard Windows window controls. The window is divided into two main sections: "Pre-secado" on the left and "Post-secado" on the right. Each section contains seven rows of input fields with corresponding labels. The "Pre-secado" section has the following labels and values: "Masa de aire extraida de la campana [Kg/s]" (empty), "Masa de aire insuflada en la campana [Kg/s]" (0,000), "Calor recuperado del aire de extraccion [KW]" (empty), "Calor recuperado del vapor flash [KW]" (empty), "Calor suministrado al aire por el vapor vivo [KW]" (empty), "Consumo de vapor vivo [Ton/hr]" (empty), and "Calor que se pierde con el aire de extraccion despues del intercambio [KW]" (0,000). The "Post-secado" section has the following labels and values: "Masa de aire extraida de la campana [Kg/s]" (empty), "Masa de aire insuflada en la campana [Kg/s]" (empty), "Calor recuperado del aire de extraccion [KW]" (empty), "Calor recuperado del vapor flash [KW]" (empty), "Calor suministrado al aire por el vapor vivo [KW]" (0,000), "Consumo de vapor vivo [Ton/hr]" (empty), and "Perdida de calor debido al calentamiento del aire que se introduce al hood por espacios abiertos [KW]" (empty). A "Volver" button is located at the bottom right of the window.

Pre-secado		Post-secado	
Masa de aire extraida de la campana [Kg/s]	<input type="text"/>	Masa de aire extraida de la campana [Kg/s]	<input type="text"/>
Masa de aire insuflada en la campana [Kg/s]	0,000	Masa de aire insuflada en la campana [Kg/s]	<input type="text"/>
Calor recuperado del aire de extraccion [KW]	<input type="text"/>	Calor recuperado del aire de extraccion [KW]	<input type="text"/>
Calor recuperado del vapor flash [KW]	<input type="text"/>	Calor recuperado del vapor flash [KW]	<input type="text"/>
Calor suministrado al aire por el vapor vivo [KW]	<input type="text"/>	Calor suministrado al aire por el vapor vivo [KW]	0,000
Consumo de vapor vivo [Ton/hr]	<input type="text"/>	Consumo de vapor vivo [Ton/hr]	<input type="text"/>
Calor que se pierde con el aire de extraccion despues del intercambio [KW]	0,000	Calor que se pierde con el aire de extraccion despues del intercambio [KW]	<input type="text"/>
Perdida de calor debido al calentamiento del aire que se introduce al hood por espacios abiertos [KW]	<input type="text"/>	Perdida de calor debido al calentamiento del aire que se introduce al hood por espacios abiertos [KW]	<input type="text"/>

Volver

El menú desplegable **OPCIONES** ubicado en la esquina superior izquierda de la ventana **VENTILACIÓN CAMPANA**, contiene el comando **DATOS GENERALES** y el menú desplegable **APLICACIONES**, el cual a su vez contiene los comandos **COSTO ENERGIA** y **CALCULOS VARIOS**.

Haga clic sobre el comando **DATOS GENERALES** cada vez que abra la ventana **VENTILACIÓN CAMPANA**. Cuando se realiza esta acción emerge una ventana llamada **DATOS DE PRODUCCION**; en esta ventana el usuario debe digitar los datos de velocidad de operación de la máquina, peso del papel producido y el ancho promedio del papel en los respectivos campos de entrada. (Ver figura 52).

Figura 52. Ventana datos de producción



Variable	Valor
Velocidad de Operacion [m/min]	709.8
Peso del papel [gr/m ²]	75.57
Ancho promedio del papel en secadores [m]	6.19

Cargar Datos

Haga clic sobre el botón **CARGAR DATOS** de la ventana **DATOS DE PRODUCCIÓN** para asignar los valores digitados a las variables internas del programa. La ventana desaparecerá.

Volver

Haga clic sobre el botón **VOLVER** para cerrar esta ventana.

La descripción del comando **COSTO ENERGIA** se hizo arriba.

La acción del clic sobre el comando **CALCULOS VARIOS** despliega la ventana **CALCULOS**, la cual está dividida en tres partes: **AIRE AMBIENTE**, **AIRE EN EL INTERIOR DEL EDIFICIO** y **CONSUMO DE VAPOR**. La primera parte requiere el ingreso de los valores de la presión atmosférica y de la temperatura de bulbo seco y húmedo del aire ambiente; con estos datos el programa calcula y muestra los valores de temperatura de punto de rocío y de humedad absoluta y relativa del aire ambiente. La segunda parte requiere de los datos de la primera además de los datos de temperatura de bulbo seco y húmedo del aire en el edificio, con estos datos, el programa calcula la temperatura de punto de rocío en el interior del edificio y la temperatura mínima requerida a la que se debe mantener el aire que se sopla bajo techo para evitar la condensación del vapor de agua que contiene el aire. La tercera parte permite el cálculo de consumos energético y de vapor para el proceso de calentamiento del aire; para esto, se requiere el ingreso de los datos de temperatura del aire en el inicio y al final del proceso, humedad absoluta o específica del aire, el gasto de masa del aire y la presión de operación del intercambiador de calor. (Ver Figura 53). Cada parte a la que se hace mención cuenta con dos botones; el botón **CALCULAR** y el botón **BORRAR**. La función es la misma en todos los casos; el primero asigna los datos digitados a las variables

internas y calcula resultados, el segundo limpia los campos de entrada y salida de datos.

Figura 53. Ventana cálculos

The image shows a software window titled "CALCULOS" with a blue title bar and standard window controls. The window is divided into several sections for data entry:

- Top Section:** A single input field for "Presion Atmosferica [KPa]" and a "Volver" button.
- Aire ambiente (Left Column):** Five input fields for "Temperatura ambiente [C]", "Temperatura bulbo humedo [C]", "Temperatura punto de rocio [C]", "Humedad absoluta [KgH2O/KgAire]", and "Humedad relativa [%]".
- Aire en el interior del edificio (Right Column):** Five input fields for "Temperatura bajo sombra [C]", "Temperatura de bulbo humedo en el edificio [C]", "Resistencia Termica del techo [m^2 C/W]", "Temperatura punto de rocio [C]", and "Temperatura del aire para soplo bajo techo [C]".
- Consumo de vapor (Bottom Section):** Four input fields for "Temperatura inicial del aire [C]", "Temperatura del aire despues del calentamiento [C]", "Humedad absoluta [KgH2O/KgAire]", "Flujo masico de Aire [Kg/s]", "Presion de operacion del intercambiador [Barg]", "Vapor Consumido [Kg/hr]", and "Energia consumida [KW]".

Each column of input fields has a "Calcular" button at the bottom, and the bottom section also includes a "Borrar" button.

7.2.3 Comando pérdida de calor por superficies. Este comando abre la ventana **PÉRDIDA DE CALOR POR SUPERFICIES** (Figura 54) la cual está conformada por cinco (5) campos desplegables de selección, nueve campos de entrada de datos y tres campos de salida de datos. Esta aplicación permite el cálculo de las pérdidas de calor para superficies aisladas y sin aislar.

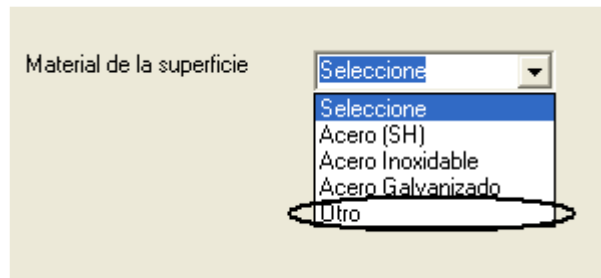
Figura 54. Ventana pérdida de calor por superficies

- El primer campo desplegable de selección permite escoger el tipo de superficie sobre la cual se desea determinar las pérdidas de calor. (Ver figura 55)

Figura 55. Primer campo desplegable de selección (TIPO DE SUPERFICIE)

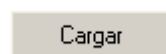
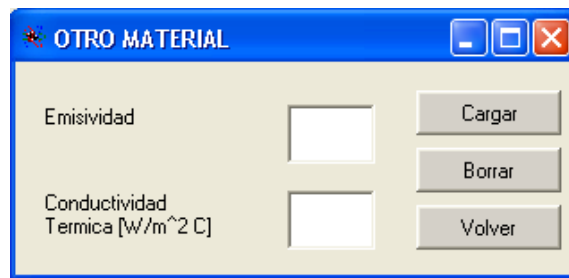
- El segundo campo desplegable de selección permite escoger el material del cual está fabricada dicha superficie. (Ver figura 56).

Figura 56. Segundo campo desplegable de selección (MATERIAL DE LA SUPERFICIE)

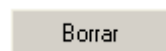


Si el usuario selecciona la opción **OTRO**, se despliega la ventana **OTRO MATERIAL**, la cual permite al usuario introducir los valores de emisividad y conductividad térmica del material cuando el mismo no se encuentra entre las opciones dadas en este campo. (Ver figura 57).

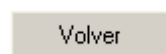
Figura 57. Ventana otro material



Haga clic en el botón **CARGAR** para introducir los valores digitados al programa.



Haga clic en el botón **BORRAR** para limpiar los campos.



Haga clic en el botón **VOLVER** para cancelar esta opción y cerrar esta ventana.

- El tercer campo desplegable de selección permite escoger el material de la chaqueta del aislamiento cuando la superficie está aislada. (Ver figura 58).

Figura 58. Tercer campo desplegable de selección (MATERIAL DE LA CHAQUETA DEL AISLAMIENTO)

The image shows a software interface for selecting insulation jacket material. It features a label 'Material de la chaqueta del Aislamiento' and a dropdown menu. The menu is open, showing a list of options: 'Seleccione', 'Aluminio en servicio', 'Acero inoxidable nuevo', 'Acero inoxidable en servicio', 'Hierro o acero', and 'Acero galvanizado'. Below the dropdown are two buttons: 'Calcular' and 'Refrescar'.

- El cuarto campo desplegable de selección permite escoger el tipo de fluido que es transportado en el interior de la tubería. (Ver figura 59).

Figura 59. Cuarto campo desplegable de selección (TIPO DE FLUIDO)

The image shows a software interface for selecting fluid type. It features a label 'Tipo de Fluido' and a dropdown menu. The menu is open, showing a list of options: 'Seleccione', 'Vapor Saturado', 'Agua', and 'Aire'. Below the dropdown is a text input field.

- El quinto campo de acción desplegable permite escoger el tamaño o diámetro nominal de la tubería. (Ver figura 60).

Figura 60. Quinto campo desplegable de selección (DIAMETRO NOMINAL DEL TUBO)

The image shows a software interface for selecting nominal pipe diameter. It features a label 'Diámetro nominal del Tubo' and a dropdown menu. The menu is open, showing a list of options: '1/2', '10', '12', '14', '16', '18', '20', '24', and 'Otro'. The 'Otro' option is circled with a hand icon, indicating it is the selected option.

Cuando el usuario selecciona la opción **OTRO** se despliega la ventana **DIAMETROS**, la cual permite al usuario introducir los valores para el diámetro

exterior e interior del tubo cuando el mismo no se encuentra entre las opciones dadas en este campo. (Ver figura 61).

Figura 61. Ventana diámetros

Cuando en el primer campo desplegable se selecciona la opción tubo horizontal o tubo vertical aparecerá justo debajo de este campo dos opciones de selección **TEMPERATURA SUPERFICIAL CONOCIDA** y **TEMPERATURA DEL FLUIDO EN EL TUBO CONOCIDA**, además del quinto campo desplegable de selección. (Ver figura 62).

Figura 62. Ventana pérdida de calor por superficies (opciones)

La opción **TEMPERATURA SUPERFICIAL CONOCIDA** está seleccionada por defecto.

La opción **TEMPERATURA DEL FLUIDO EN EL TUBO CONOCIDA** permite el cálculo de las pérdidas de calor a través de tuberías cuando se tiene el dato de la temperatura del fluido y su velocidad. Esta opción posibilita la aparición del cuarto campo desplegable de selección y del campo de entrada para la introducción del valor de la velocidad del fluido en el interior del tubo. (Ver figura 63).

Figura 63. Ventana pérdida de calor por superficies (TEMPERATURA DEL FLUIDO EN EL TUBO CONOCIDA)

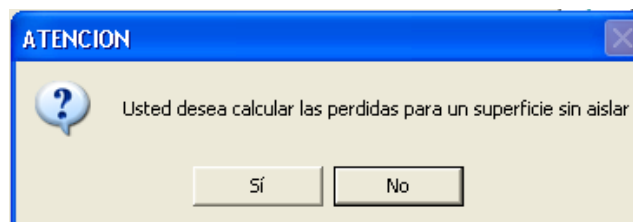
Cuando en el primer campo desplegable se selecciona la opción ducto horizontal, ducto vertical o cualquiera de las opciones de superficies planas presentadas en este campo; dos campos de entrada se habilitarán para que el usuario introduzca las dimensiones de la superficie o geometría escogida. (Ver figura 64).

Figura 64. Ventana pérdida de calor por superficies (campos de entrada para las dimensiones de la superficie)

Los botones **CALCULAR**, **REFRESCAR**, **BORRAR** y **SALIR** realizan las mismas funciones que los botones de igual nombre descritos anteriormente.

Para calcular las pérdidas de calor en superficies desnudas, deje los campos de entrada de la conductividad térmica del aislamiento y el espesor del mismo vacíos, y haga clic sobre el botón **CALCULAR**; aparece una ventana volátil para la confirmación de la operación a realizar. (Ver figura 65).

Figura 65. Ventana volátil (CONFIRMACION DE LA OPERACIÓN A REALIZAR)



Haga clic sobre el botón **SI** cuando lo que desea es calcular las pérdidas para un tubo desnudo; de lo contrario, haga clic sobre el botón **NO**, en cuyo caso los

cálculos no se realizan y se deben digitar los valores de conductividad térmica y espesor del aislamiento en los campos correspondientes.

El menú **OPCIONES** ubicado en la esquina superior izquierda de la ventana **PERDIDA DE CALOR POR SUPERFICIES**, contiene el comando **COSTO ENERGIA**, el cual bajo la acción de clic despliega la ventana **COSTO DE LAS PERDIDAS POR AÑO**, el manejo y forma de esta ventana solo difiere de la **COSTO DE LA ENERGIA** en un campo de entrada extra para el ingreso de la longitud de la tubería, ducto o área de la superficie cuando se trata de una superficie plana. (Ver figura 66).

Figura 66. Ventana costo de las pérdidas por año

COSTO DE LAS PERDIDAS POR AÑO

Combustible:

Eficiencia de la caldera [%]:

Precio del Combustible:

Calor Perdido [W/m] o [W/m²]:

Horas de Operacion por año:

COSTO DE LA ENERGIA [Pesos/Año]:

CAMPO DE ENTRADA DE DATOS PARA EL INGRESO DE LA LONGTUD DE LA TUBERIA O DUCTO O EL AREA DE LA SUPERFICIE.

Longitud o area de la Superficie:

Calcular Refrescar

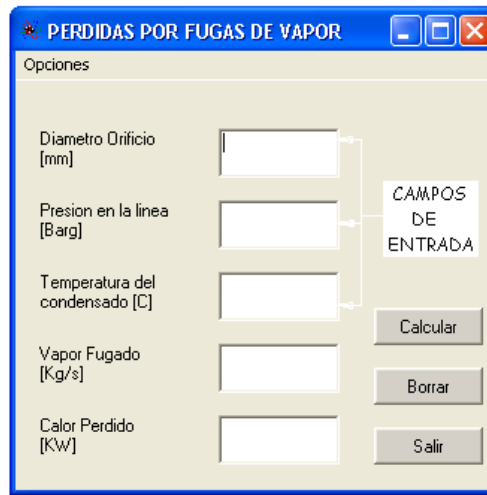
Borrar Volver

7.2.4 Comando pérdidas de calor por fugas de vapor. Haga clic sobre este comando para abrir la ventana **PERDIDAS POR FUGAS DE VAPOR**. (Ver figura 67).

La ventana **PERDIDAS POR FUGAS DE VAPOR**, contiene tres campos de entrada de datos para el ingreso de valores como: diámetro del orificio de la fuga, presión del vapor en la línea y la temperatura de condensado (recuperación de condensados); y dos campos de salida de datos bloqueados contra escritura, en los cuales se muestran los resultados obtenidos para la cantidad de vapor fugado y las pérdidas energéticas que esto conlleva.

Los botones **CALCULAR**, **BORRAR** y **SALIR** realizan la misma función que los botones de igual nombre mencionados anteriormente.

Figura 67. Pérdidas por fugas de vapor



El menú **OPCIONES**, ubicado en la esquina superior izquierda contiene el comando **COSTO ENERGIA**. La descripción de este comando se hizo anteriormente.

7.3 CAPTURA DE ERRORES

El programa solo recibe valores numéricos, por lo tanto, cada vez que el usuario digite en un campo de entrada datos tipo letra o por el contrario deja este campo vacío el programa no se ejecuta y muestra un mensaje de error con información acerca del error cometido. (Ver figura 68).

Figura 68. Mensaje de error valores nulos o campos vacíos



Los errores de desbordamiento comúnmente ocurren debido a la división por cero en algún proceso llevado a cabo en el programa, en estos casos, el programa se bloquea cancelando la ejecución del mismo; este no es el caso para este

programa, cuando el denominador de una de las ecuaciones que constituyen este programa es cero, el programa asigna a todas las variables valores nulos mostrando resultados iguales a cero en los campos de salida sin el consecuente bloqueo del programa.

8. METODOLOGIA

Este trabajo se realizó en la sección de secado de la máquina de papel número cuatro (4) de PROPAL S.A. (Productora de papeles S.A.), en el municipio de Caloto, departamento del Cauca, en el período comprendido entre el 16 de abril y el 10 de diciembre de 2007.

Una vez iniciado el período de pasantía se recibió la inducción de seguridad industrial, con el fin, de reconocer los riesgos a los que se estaría expuesto durante dicho período y las normas de seguridad que se deben seguir en la planta; posteriormente se realizó la lectura de los manuales que describen el proceso de secado de papel y los equipos involucrados en el mismo, permitiendo tener un concepto teórico del funcionamiento de la maquina de papel antes de realizar la observación del proceso en el sitio. Cuando el proceso fue entendido completamente se procedió a realizar investigaciones acerca de las variables que afectan el proceso de secado, la Tabla 11 muestra las variables medidas, el lugar de la toma y el instrumento utilizado. Estas medidas se realizaron los meses de Junio, Septiembre, Octubre y Diciembre de 2007.

Una vez realizadas estas mediciones se procedió a calcular las variables como humedad específica o absoluta del aire ambiente y del aire en el interior de la máquina de papel (en cada bolsillo) este análisis sirvió para observar la situación humedad de la maquina y describir fenómenos que no pueden ser percibidos a simple vista; igualmente se calcularon las presiones parciales de vapor en el aire y en el papel con el fin de describir el fenómeno de transferencia de masa y verificar el sentido de dicha transferencia.

Posteriormente, se graficaron los valores de las temperaturas de la superficie del cilindro secador, del vapor y del papel, con el fin de establecer comparaciones en cuanto al comportamiento y determinar si estos valores se encontraban dentro de los rangos recomendados por compañías dedicadas al diseño de equipos y sistemas de este sector industrial.

Luego, se realizó una serie de investigaciones para establecer las correlaciones experimentales encontradas por personas que han estudiado anteriormente este proceso, y usar dichas expresiones dentro de los balances de masa y energía que se realizaron posteriormente.

Los balances de masa y energía se abstuvieron para cada proceso en donde se lleva a cabo la transferencia de calor en la sección de secado, para obtener un conjunto de ecuaciones, lo cual permitió cuantificar: consumos de energía, condensado, vapor, estimar pérdidas, eficiencia de la sección de secado, entre otros; posteriormente, se realizó la sistematización de las variables en el programa Visual Basic 6.0.

Luego, para la verificación del modelo, se comparó el valor de consumo de vapor calculado con el valor que se obtiene por medio de la instrumentación instalada en la máquina.

Tabla 11. Medición de variables

Medición	Lugar	Instrumento
Medio Ambiente		
Temperatura de bulbo seco	En la azotea y en el interior del edificio.	Termómetro.
Temperatura de bulbo húmedo	En la azotea y en el interior del edificio	Termómetro con mecha de algodón.
Aire de proceso		
Temperatura de bulbo seco del aire después del calentamiento.	Después de cada intercambiador de calor.	Termocupla.
Temperatura de bulbo seco del aire en el Hood.	En los ductos de extracción.	Termocupla.
Temperatura de bulbo húmedo del aire en el Hood.	En los ductos de extracción.	Termómetro con mecha de algodón.
Temperatura de bulbo seco del aire próximo a los cilindros.	En cada bolsillo de la máquina.	Termómetro.
Temperatura de bulbo húmedo del aire próximo a los cilindros.	En cada bolsillo de la máquina.	Termómetro con mecha de algodón.
Cilindros secadores		
Presión de alimentación de vapor.	En la instrumentación instalada en los Cilindros.	En la instrumentación instalada en los Cilindros.
Presión diferencial	En la instrumentación instalada en los Cilindros.	En la instrumentación instalada en los Cilindros.
Temperatura de la superficie de los cilindros secadores.	En un extremo del cilindro secador. Lado control de la máquina.	Termocupla de contacto tipo K.

Hoja de Papel		
Temperatura del papel.	En la hoja papel antes y después de pasar sobre el cilindro secador (en todos los sesenta y uno (61) cilindros).	Pirometro infrarrojo.
Peso Base o Gramaje.	Al final del proceso.	En la instrumentación instalada en la maquina de papel.
Humedad del papel.	En la entrada y la salida de cada sección de secado.	En la instrumentación instalada en la maquina de papel.
Longitud de papel en contacto con cada secador.	Plano Máquina de papel.	Ayuda computacional programa Autocad.
Longitud efectiva de la camisa del cilindro secador.	Manuales de construcción de la maquina.	
Diámetro del cilindro secador.	Manuales de construcción de la maquina.	
Máquina de papel		
Velocidad de producción.	En la instrumentación instalada en la maquina de papel.	En la instrumentación instalada en la maquina de papel.
Temperatura del Hood.	Superficie exterior del Hood.	Termocupla de contacto tipo K.
Dimensiones del Hood.	Plano Máquina de papel.	Ayuda computacional programa Autocad.
Ductos y tuberías		
Temperatura del fluido en el ductos.	En los ductos de extracción y insuflación.	Termocupla.
Temperatura superficial	En la superficie de ductos y tuberías.	Termocupla de contacto tipo K.
Dimensiones de ductos y tuberías.	En cada ducto o tubería.	Flexo metro.

9. RESULTADOS

9.1 ANALISIS DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE SECADO

Para analizar el proceso de secado de la Máquina de Papel 4 de PROPAL S.A., es importante determinar el comportamiento de las variables involucradas en este proceso, por lo anterior se llevaron a cabo las siguientes mediciones:

- ✓ Temperatura superficial de secadores.
- ✓ Temperatura del papel.
- ✓ Temperatura de bulbo húmedo en las cavidades de la sección de secado (bolsillos).
- ✓ Temperatura de bulbo seco en los bolsillos.

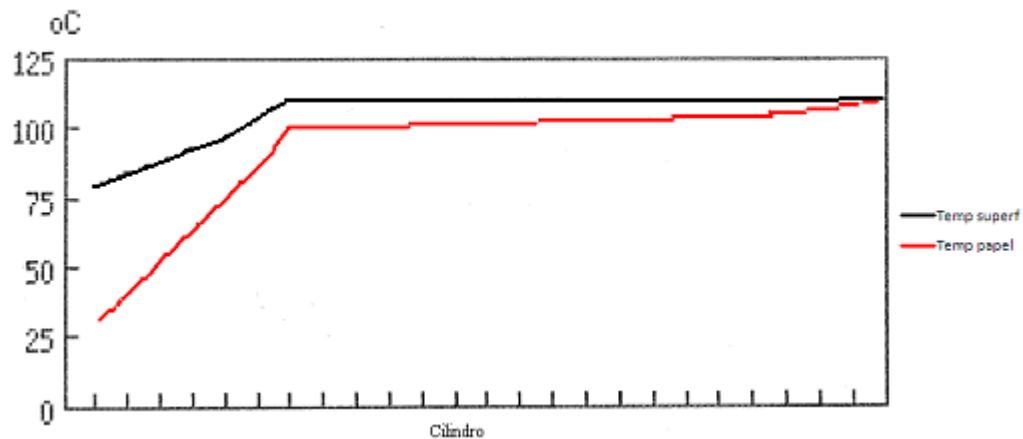
Los instrumentos utilizados para realizar dichas mediciones fueron:

- ✓ Pirómetro infrarrojo.
- ✓ Termocupla de contacto tipo K.
- ✓ Termómetro de bulbo húmedo.

9.1.1 Temperaturas del vapor, de la superficie de los cilindros secadores y del papel. Teóricamente se sabe que la temperatura superficial de los primeros cuatro o cinco secadores de una sección de secado, debe ser la más baja de toda la sección de secado, con el fin, de mantener un gradiente de temperatura en el sentido longitudinal de la maquina de papel y así, favorecer la evaporación.

La evolución teórica de las temperaturas de vapor, superficie de secadores y papel debe ser la siguiente: la temperatura del papel se incrementa mientras que la de los secadores aumenta muy lentamente; luego, la temperatura del papel continúa aumentando mientras que la de los cilindros permanece constante. La temperatura de los secadores aumenta siempre que la del vapor también lo haga. (Ver figura 69).

Figura 69. Curva teórica temperatura superficial del secador vs. Temperatura del papel



Fuente: DIAZ ALBERDI, Pablo. Conferencia sobre estudio de eficiencia de baterías de secado. Propal S.A. Colombia, 1989.

A continuación se presentan las mediciones de temperatura en la superficie de los secadores y en el papel hechas en la máquina de papel 4 de PROPAL S.A. Gráfica 1 y 2.

Fecha: Septiembre 5 del 2007

Datos de Producción:

Velocidad de la máquina [m/min]	680
Ancho de la hoja [m]	6.19
Peso [gr./m ²]	75.24
Producción [Ton/día]	456.05
%seco prensas	39.5
%seco salida pre-secado	96.04
%seco salida post-secado	96.04
Apresto rodillo móvil [l/min]	800
Apresto rodillo fijo [l/min]	830
% sólidos en el apresto	8

En la Gráfica 1 y 2. Se observó un comportamiento diente de sierra, tanto en el papel como en los cilindros; lo cual se esperaba que ocurriera en el papel, pues este sufre un enfriamiento espontáneo cada vez que pasa por los espacios abiertos, entre los secadores superiores e inferiores; en cuanto a la temperatura

en la superficie de los secadores, se esperaba un comportamiento igual a la curva de temperatura del vapor, pues la temperatura superficial de los cilindros debe ser constante en cada grupo de secadores.

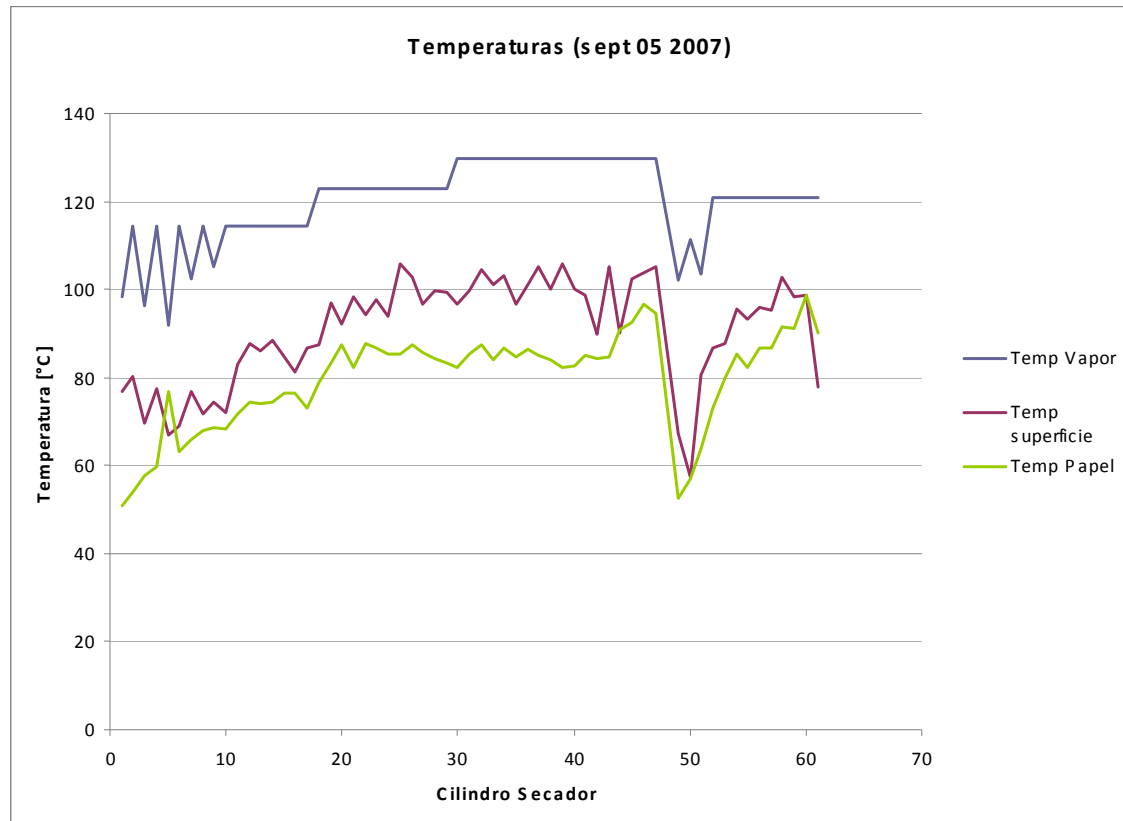
La diferencia de temperatura entre la superficie del secador y el vapor, es mayor a 20 °C, la cual es muy grande comparada con el valor de 7°C que recomienda Kadant Johnson como una buena practica en la operación de secadores. Cuando se observa un comportamiento de este tipo en la temperatura superficial de los cilindros secadores se debe verificar:

- ✓ Posibles obturaciones en la entrada de vapor a los cilindros: cuando este sea el caso se observará que la temperatura en la tapa del secador será igual o estará muy cerca a la temperatura en la superficie del mismo.
- ✓ Exceso de condensado en el interior del secador: si este es el problema, entonces la temperatura en la superficie del secador será menor que la de las tapas del mismo y se sugiere revisar sistema de drenaje de condensado y diferenciales de presión.

De igual forma, en la gráfica se observa que la diferencia de temperatura entre la superficie del secador y el papel es muy grande, esto puede ser causado por:

- ✓ Tensión de la lona insuficiente.
- ✓ La permeabilidad de la lona puede estar siendo afectada por suciedad, lo que provocara una disminución del aire que se introduce en el bolsillo por arrastre de la misma.
- ✓ Baja temperatura del aire en los bolsillos.
- ✓ El error en la medición de la temperatura, debido a que se requiere cierto cuidado con la manipulación del equipo.

Gráfica 1. Temperatura de la superficie del secador, del papel y el vapor

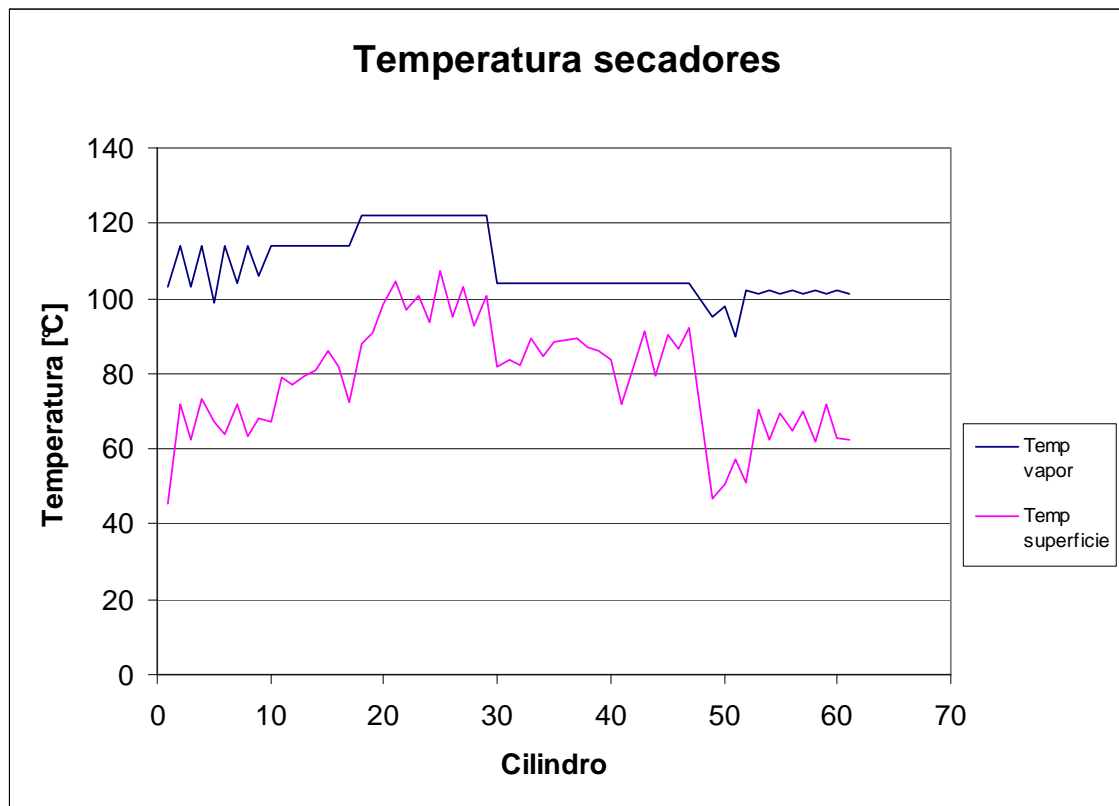


Fecha: Octubre 12 del 2007

Datos de Producción:

Velocidad de la máquina [m/min]	709
Ancho de la hoja [m]	6.19
Peso [gr./m ²]	57.8
Producción [Ton/dia]	365.3
%seco prensas	39.5
%seco salida pre-sequería	91.77
%seco salida post-sequería	94.45
Apresto rodillo móvil [l/min]	-
Apresto rodillo fijo [l/min]	-
% sólidos en el apresto	-

Gráfica 2. Temperatura superficial del secador vs. Temperatura del vapor



9.1.2 Contenido de humedad en los bolsillos. Otro de los parámetros importantes en el proceso de secado, es la humedad absoluta del aire en el bolsillo. El valor de humedad absoluta debe mantenerse por debajo de la humedad de saturación, razón por la cual, el valor de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo deben estar lo mas alejados posibles. Se recomienda que la diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo y seco sea como mínimo de 5°C.

En la Gráfica 3 se muestran los valores de temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco.

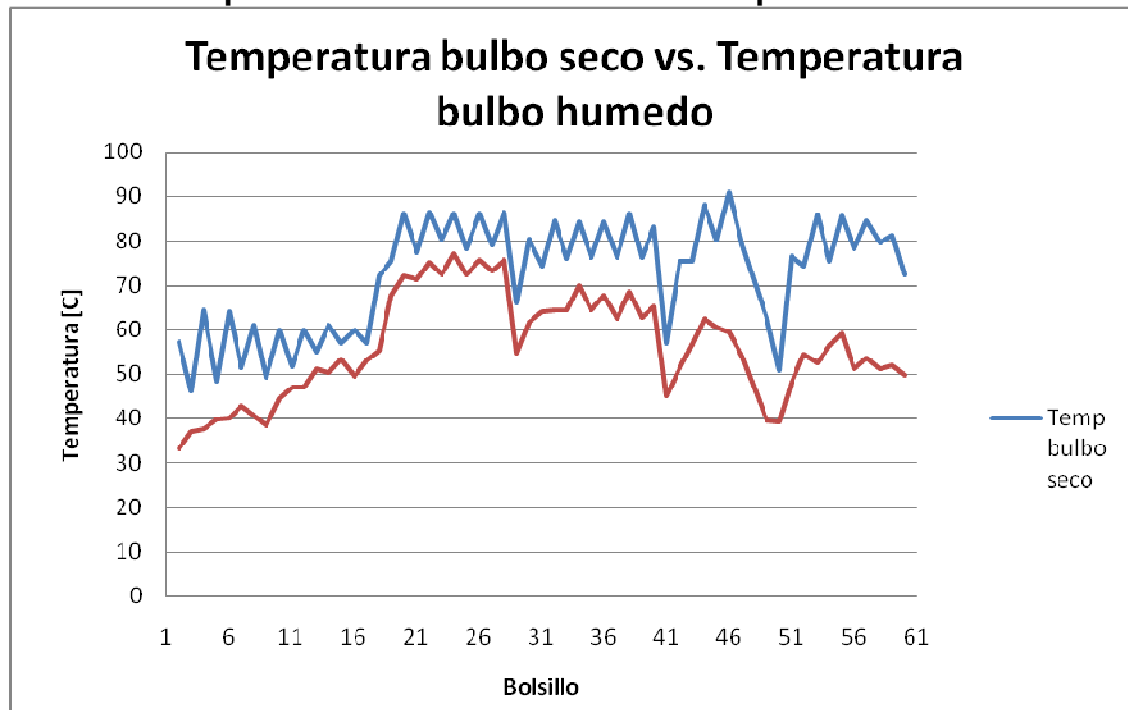
Fecha: Octubre 06 del 2007

Datos de producción:

Velocidad de la máquina [m/min]	660
Ancho de la hoja [m]	6.19
Peso [gr./m ²]	75.04
Producción [Ton/dia]	441.46

%seco prensas	39.5
%seco salida pre-sequería	95.95
%seco salida pos-sequería	96.05
Apresto rodillo móvil [l/min]	750
Apresto rodillo fijo [l/min]	750
% sólidos en el apresto	8

Gráfica 3. Temperatura de bulbo húmedo vs. Temperatura bulbo seco



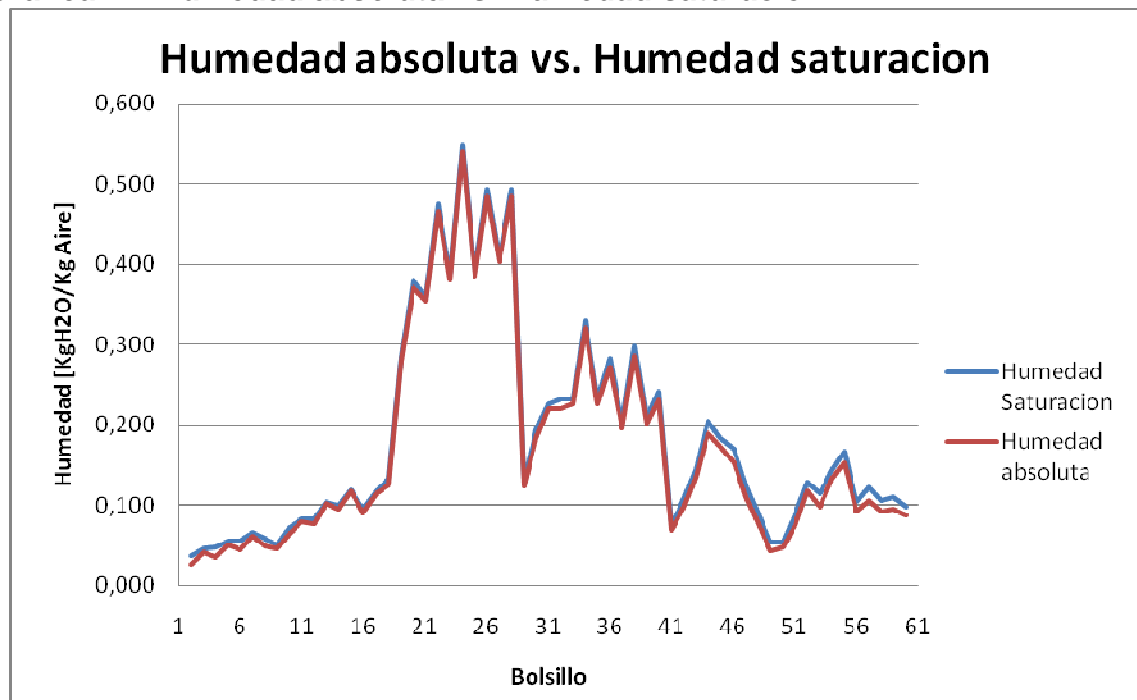
Como se puede apreciar en la gráfica 3, la diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco, en los bolsillos de los secadores 13 y 17, es de aproximadamente 4°C, diferencia menor de la recomendada; por consiguiente, se puede esperar que el aire en estos bolsillos se encuentre muy cerca de una situación de saturación. Problema que puede ser causado por múltiples factores:

- ✓ La ventilación de bolsillos es deficiente.
- ✓ Exceso de mugre en las lonas, lo cual puede afectar la ventilación del bolsillo.
- ✓ Baja temperatura del aire que esta siendo insuflado.
- ✓ Extracción de aire insuficiente.

✓ Exceso de entrada de aire ambiente (aire frío) por aberturas, puertas abiertas, etcétera.

En la Gráfica 4 se muestran los valores obtenidos de humedad absoluta y se comparan con los valores de humedad de saturación. En general, ninguno de los bolsillos se encuentra en situación saturada. Estos valores se obtuvieron gracias a los datos medidos de temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco y a la aplicación de las ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.11 a 5.16.

Gráfica 4. Humedad absoluta vs. Humedad saturación



9.1.3 Fuerza de secado en función de las presiones de vapor del ambiente y el papel. La fuerza secadora, también conocida como presión de evaporación o fuerza de transferencia, es la diferencia de presión de vapor entre el agua que se va a evaporar y el aire circundante. La presión de vapor del agua en el papel, es la correspondiente a su temperatura y la presión de vapor de agua del aire se determina por su punto de rocío; lo que se pretende, es que la presión de vapor del aire, sea lo mas baja posible, mientras que la del papel lo más alta posible; con el fin, de asegurar la transferencia de masa del agua evaporada de la hoja hacia el ambiente circundante.

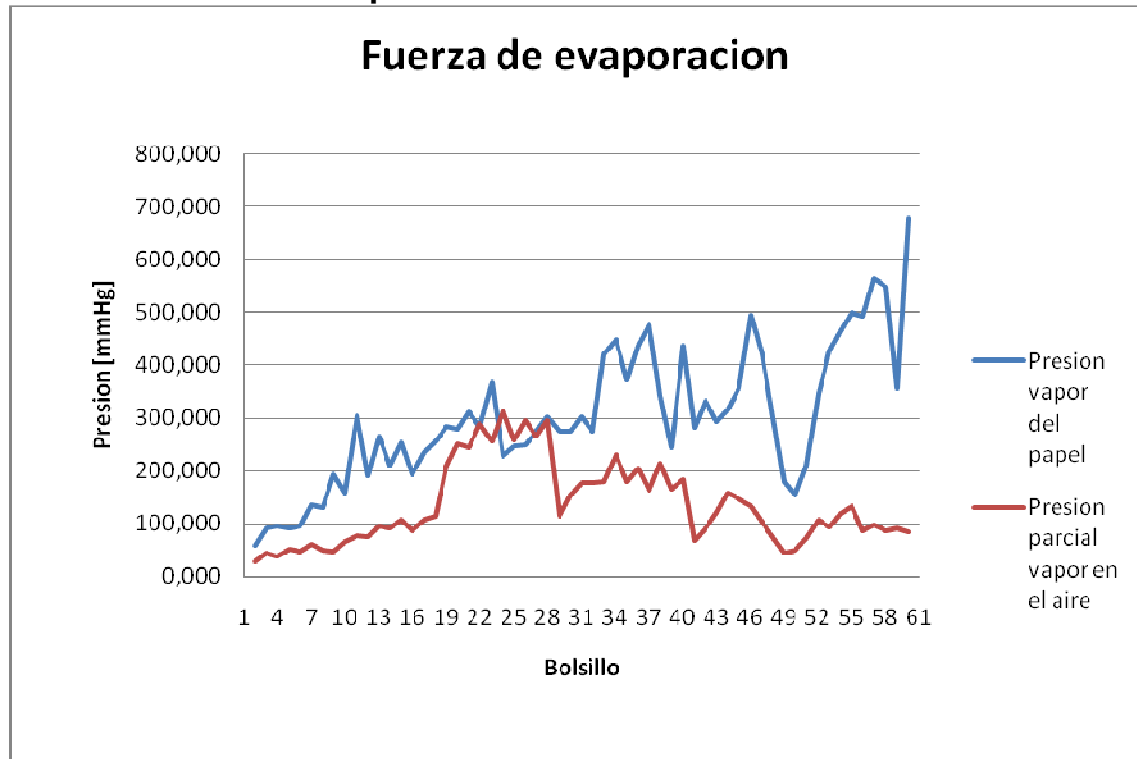
Como la presión de saturación del agua en el papel aumenta con la temperatura, según una curva exponencial, se espera que la temperatura del papel se mantenga lo suficientemente alta, asegurando un secado eficiente.

El valor recomendado para la presión de vapor en el papel, es de 500 mmHg y de 120 mmHg para el aire del bolsillo.

En la Gráfica 5 se aprecia una presión de vapor en el aire, inferior a la presión de vapor del papel, lo cual es bueno; sin embargo, en los cilindros 22, 24, 25 y 26 la presión de vapor del papel es menor que la del aire; en estos casos se produce una re-humectación del papel y como consecuencia un aumento en el consumo de vapor. Para garantizar fuerzas de evaporación altas se debe principalmente:

- ✓ Mantener la temperatura del papel lo suficientemente alta.
- ✓ Mantener el Hood balanceado en el nivel de punto nulo.
- ✓ Mantener la temperatura de punto de rocío lo más baja posible.
- ✓ Asegurar una adecuada tensión de la lona.

Gráfica 5. Fuerza de evaporación



Los valores de presión de vapor del papel se obtienen de la ecuación 5.15 reemplazando el valor de la temperatura de bulbo húmedo por la temperatura del papel medida en cada cilindro secador; mientras que el valor de la presión parcial del vapor de agua en el aire, se obtiene de la combinación de las ecuaciones 5.11 a 5.16, los valores obtenidos con estas ecuaciones deben ser multiplicadas por 7.5 mmHg/KPa para convertir KPa en mmHg.

9.2 RESULTADOS OBTENIDOS POR MEDIO DEL PROGRAMA

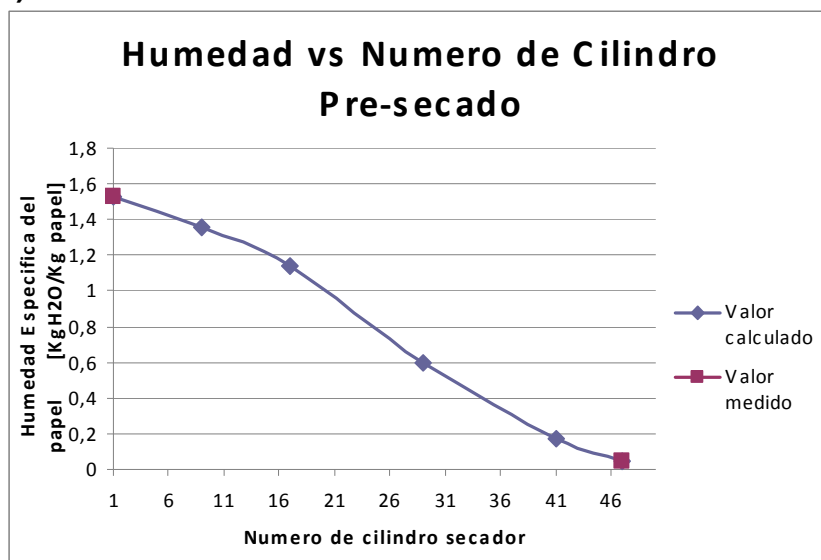
9.2.1 Resultados máquina de papel cilindros secadores. Los resultados mostrados en las tablas 12 y 13 se obtuvieron mediante la aplicación del programa realizado y se comparan con los valores medibles en la maquina de papel. Los datos que no se muestran a continuación como presión de vapor, presiones diferenciales, temperaturas del papel, datos de producción, entre otros, se muestran en el Anexo D.

Tabla 12. Resultados grupos de cilindros sección pre-secado

Variable	Medido	Programa	Unidades
Producción.	19	19	Ton/hr
Humedad absoluta del papel en prensas.	1.532	1.532	KgH ₂ O/Kg Papel
Humedad absoluta del papel después de pre-secado.	0.041	0.043	KgH ₂ O/Kg Papel
Temperatura del papel después de prensas.	49.3		°C
Temperatura del papel después de pre-secado.	98.1		°C
Agua evaporada.	28.329	28.292	Ton/hr
Rata de evaporación.	23.91	23.685	Kg/hr m ²
$h_{\text{CONT},(0)}$	200-500	400	W/m ² °C
$h_{\text{CONT},i}$	900-1200	955	W/m ² °C
Conductividad térmica Camisa secador.	45-59	52	W/m °C
Calibración del sifón	1.5		mm
Velocidad del aire en los bolsillos.	30	30	m/s
Calor transferido al papel.		17461.989	KW
Vapor a secadores.		30.61	Ton/hr
Consumo de vapor por cantidad de agua evaporada.		1.082	KgVap/KgH ₂ O

Se graficaron los valores de humedad específica del papel versus número de cilindro secador obtenidos en la sección de pre-secado; los puntos azules representan los valores calculados mediante la aplicación del programa y los rojos representan los valores medidos en operación. Gráfica 6.

Gráfica 6. Humedad específica del papel versus número de cilindro secador (pre-secado)



En esta gráfica se puede apreciar la curva de evaporación con las cuatro zonas claramente definidas. En los primeros tres cilindros secadores se observa un cambio despreciable en la humedad específica del papel razón por la cual se puede identificar la zona de calentamiento; obsérvese también el cambio en la pendiente cuando el valor de la humedad específica del papel es de 0.6 KgH₂O/Kg papel (punto conocido como razón crítica de humedad o CMR) el cual, muestra la transición de la zona de evaporación constante a la de evaporación decreciente, la cual se extiende hasta que la humedad específica del papel tiene un valor un poco por debajo de 0.2 KgH₂O/Kg papel a partir del cual la curva sufre otro cambio de pendiente que permite identificar la zona límite.

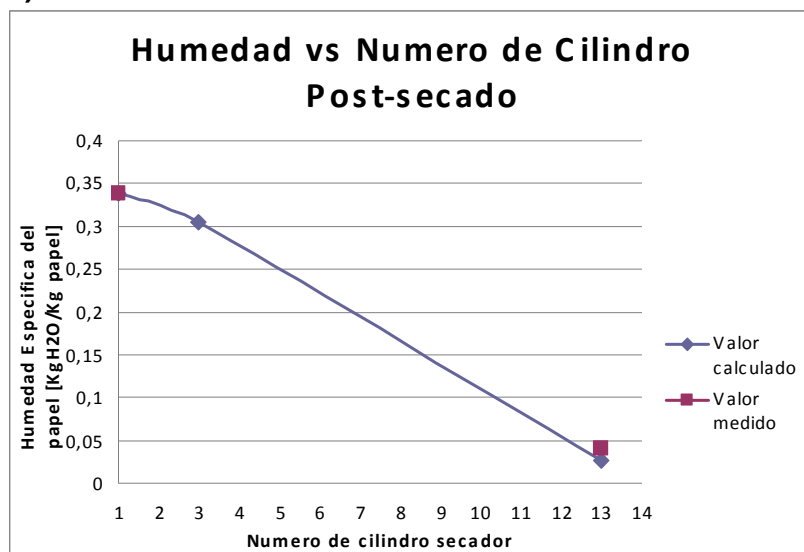
Tabla 13. Resultados grupos de cilindros sección post-secado.

Variable	Medido	Programa	Unidades
Producción.	19	19	Ton/hr
Humedad absoluta del papel en el Speed Sizer.	0.339	0.339	KgH ₂ O/Kg Papel
Humedad absoluta del papel después de post-secado.	0.041	0.0264	KgH ₂ O/Kg Papel
Temperatura del papel en el Speed Sizer.	42.5		°C

Temperatura del papel después de post-secado.	87.1		°C
Agua evaporada post-sequería.	5.662	5.933	Ton/hr
Rata de evaporación.	15.51	16.144	Kg/hr m ²
$h_{\text{CONT},(0)}$	200-500	400	W/m ² °C
$h_{\text{CONT},i}$	900-1200	955	W/m ² °C
Calibración del sifón	1.5		mm
Conductividad térmica Camisa secador.	45-59	52	W/m °C
Velocidad del aire en los bolsillos.	80	80	m/s
Calor transferido al papel en post-secado		3864.247	KW
Vapor a secadores de post-secado.		7.279	Ton/hr
Consumo de vapor por cantidad de agua evaporada.		1.226	KgVap/KgH ₂ O
Pérdidas de calor total en cilindros secadores.		1888.29	KW
Vapor total a cilindros secadores.	39.5	37.889	Ton/hr
Eficiencia		91.92	%

Se graficaron los valores de humedad específica del papel versus número de cilindro secador en la sección de post-secado; los puntos azules representan los valores calculados con el programa y los rojos representan los valores medidos en operación. Gráfica 7.

Gráfica 7. Humedad específica del papel versus número de cilindro secador (post-secado)



Debido a que la sección de post-secado es demasiado corta con respecto a la sección de pre-secado, en esta gráfica solo es posible identificar dos zonas: la zona de calentamiento y la de evaporación constante; la primera se identifica porque el cambio de humedad del papel en los primeros tres cilindros secadores es despreciable y la segunda por una pendiente constante que se mantiene hasta el final de esta sección.

Tabla 14. Sistema de Ventilación Hood de pre-secado

Variable	Medido	Unidades
Producción.	19	Ton/hr
Presión atmosférica	90	KPa
Temperatura Ambiente	37	°C
Temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente.	23.3	°C
Humedad absoluta del aire.	0.015	KgH ₂ O/Kg Aire
Temperatura promedio del aire en el Hood.	66	°C
Temperatura de bulbo húmedo del aire en el Hood.	52.78	°C
Temperatura punto de rocío del aire en el Hood.	51.66	°C
Humedad absoluta del aire en el Hood.	0.111	KgH ₂ O/Kg Aire

Humedad relativa del aire en el Hood.	51.7	%
Humedad del papel en prensas.	60.5	%
Humedad del papel después de pre-secado.	3.96	%l
Masa total de aire que debe ser extraída del Hood.	82.109	Kg/s
Masa total de aire que debe ser insuflada en el Hood.	65.688	Kg/s
Pérdidas de calor por las superficies del Hood.	23.02	KW
Calor aprovechado del aire de extracción.	686.56	KW
Calor recuperado por empleo de vapor flash en el sistema de calentamiento de aire.	1401.188	KW
Calor suministrado por el vapor vivo para el calentamiento del aire.	1483.708	KW
Consumo de vapor vivo para el calentamiento del aire.	2.519	Ton/hr
Calor para el calentamiento del aire que se introduce por espacios abiertos en el Hood.	490.954	KW
Pérdida de calor debido a alta temperatura del aire de extracción en la salida del recuperador de calor.	2170.02	KW

Tabla 15. Sistema de Ventilación Hood de post-secado

Variable	Medido	Unidades
Producción.	19	Ton/hr
Presión atmosférica	90	KPa
Temperatura Ambiente	37	°C
Temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente.	23.3	°C
Humedad absoluta del aire.	0.015	KgH ₂ O/Kg Aire
Temperatura promedio del aire en el Hood.	66	°C
Temperatura de bulbo húmedo del aire en el Hood.	49.75	°C
Temperatura punto de rocío del aire en el Hood.	48.34	°C

Humedad absoluta del aire en el Hood.	0.092	KgH ₂ O/Kg Aire
Humedad relativa del aire en el Hood.	44.08	%
Humedad del papel en prensas.	25.3	%
Humedad absoluta del papel después de pre-secado.	3.96	%
Masa total de aire que debe ser extraída del Hood.	19.416	Kg/s
Masa total de aire que debe ser insuflada en el Hood.	15.533	Kg/s
Perdidas de calor por las superficies del Hood.	8.357	KW
Calor aprovechado del aire de extracción.	204.468	KW
Calor recuperado por empleo de vapor flash en el sistema de calentamiento de aire.	256.015	KW
Calor suministrado por el vapor vivo para el calentamiento del aire.	414.024	KW
Consumo de vapor vivo para el calentamiento del aire.	0.703	Ton/hr
Calor para el calentamiento del aire que se introduce por espacios abiertos en el Hood.	116.095	KW
Pérdida de calor debido a alta temperatura del aire de extracción en la salida del recuperador de calor.	456.2	KW
Calor total aprovechado del aire de extracción.	891.028	KW
Calor total recuperado por empleo de vapor flash en el sistema de calentamiento de aire.	1657.203	KW
Calor total suministrado por el vapor vivo para el calentamiento del aire.	1897.732	KW
Consumo total de vapor vivo para el calentamiento del aire.	3.222	Ton/hr
Calor total para el calentamiento del aire que se introduce por espacios abiertos en el Hood.	607.049	KW
Eficiencia global	85.55	%

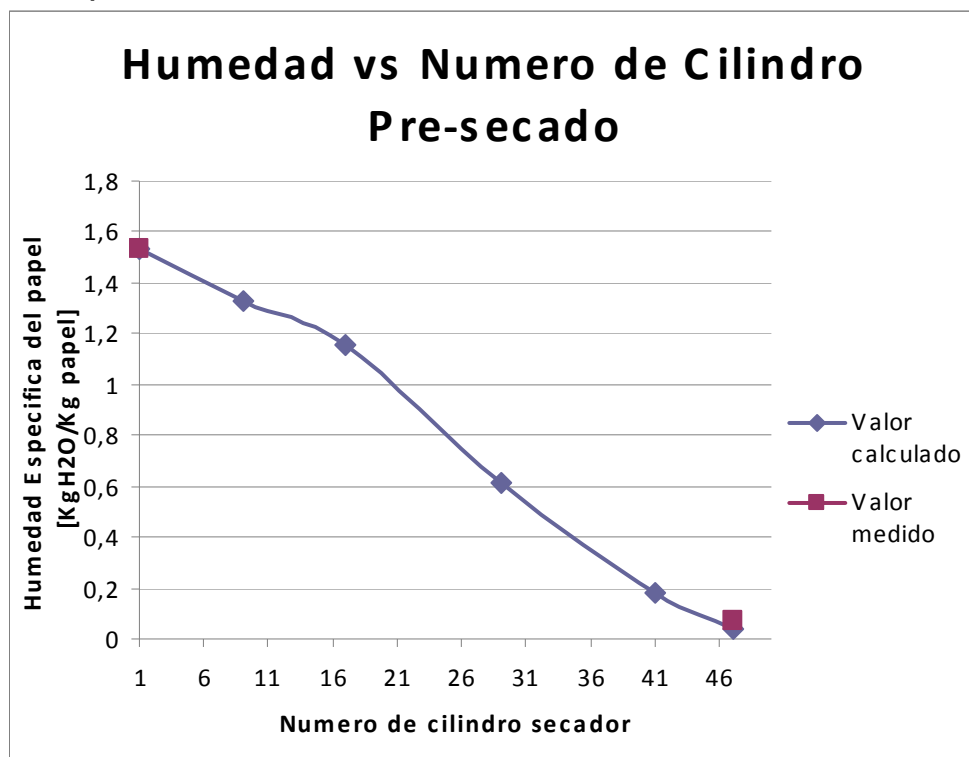
Los datos medidos para la obtención de los resultados que se muestran a continuación se tomaron del Anexo G. Los resultados que se obtienen mediante la aplicación del programa se muestran en las Tablas 16 y 17. Noviembre 10 del 2007.

Tabla 16. Resultados grupos de cilindros sección pre-secado.

Variable	Medido	Programa	Unidades
Producción.	19.922	19.922	Ton/hr
Humedad absoluta del papel en prensas.	1.532	1.532	KgH ₂ O/Kg Papel
Humedad absoluta del papel después de pre-secado.	0.07	0.0391	KgH ₂ O/Kg Papel
Temperatura del papel después de prensas.	35.4		°C
Temperatura del papel después de pre-secado.	95.2		°C
Agua evaporada.	29.126	29.736	Ton/hr
Rata de evaporación.	19.82	24.891	Kg/hr m ²
$h_{\text{CONT},(0)}$	200-500	400	W/m ² °C
$h_{\text{CONT},i}$	900-1200	955	W/m ² °C
Conductividad térmica Camisa secador.	45-59	52	W/m °C
Velocidad del aire en los bolsillos.	30	30	m/s
Calor transferido al papel.		19014.827	KW
Vapor a secadores.		33.469	Ton/hr
Consumo de vapor por cantidad de agua evaporada.		1.126	KgVap/KgH ₂ O

Se graficaron los valores de humedad específica del papel versus número de cilindro secador obtenidos en la sección de pre-secado; los puntos azules representan los valores calculados mediante la aplicación del programa y los rojos representan los valores medidos en operación. Gráfica 8.

Gráfica 8. Humedad específica del papel versus número de cilindro secador (pre-secado)



En esta gráfica se puede apreciar la curva de evaporación con las cuatro zonas claramente definidas. En los primeros tres cilindros secadores se observa un cambio despreciable en la humedad específica del papel razón por la cual se puede identificar la zona de calentamiento; obsérvese también el cambio en la pendiente cuando el valor de la humedad específica del papel es de 0.6 KgH₂O/Kg papel (punto conocido como razón crítica de humedad o CMR) el cual, muestra la transición de la zona de evaporación constante a la de evaporación decreciente, la cual se extiende hasta que la humedad específica del papel tiene un valor un poco por debajo de 0.2 KgH₂O/Kg papel a partir del cual la curva sufre otro cambio de pendiente que permite identificar la zona límite.

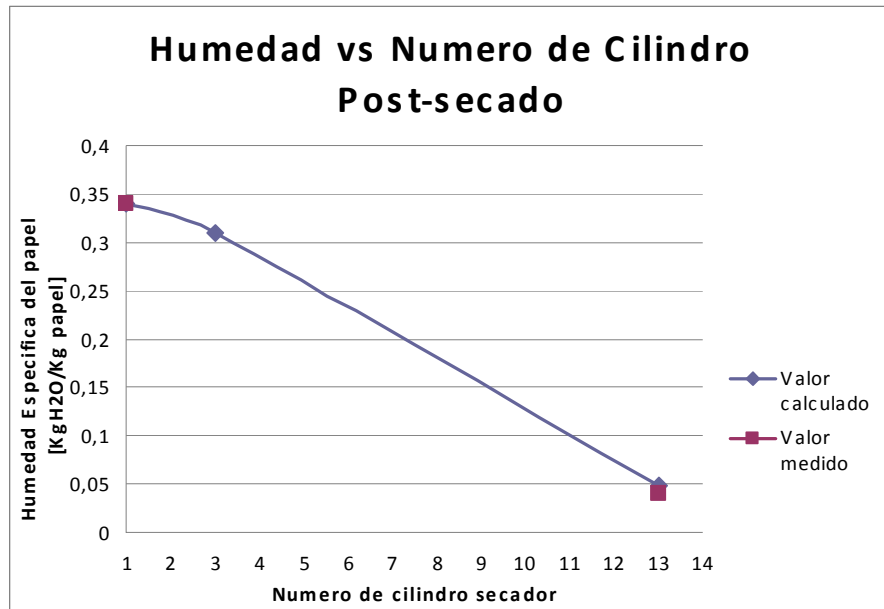
Tabla 17. Resultados grupos de cilindros sección post-secado.

Variable	Medido	Programa	Unidades
Producción.	19.922	19.922	Ton/hr
Humedad absoluta del papel en prensas.	0.339	0.339	KgH ₂ O/Kg Papel
Humedad absoluta del papel después de pre-secado.	0.041	0.043	KgH ₂ O/Kg Papel

Temperatura del papel después de prensas.	46.5		°C
Temperatura del papel después de pre-secado.	95.2		°C
Agua evaporada.	5.936	5.782	Ton/hr
Rata de evaporación.	11.48	15.732	Kg/hr m ²
$h_{\text{CONT},(0)}$	200-500	400	W/m ² °C
$h_{\text{CONT},i}$	900-1200	955	W/m ² °C
Conductividad térmica Camisa secador.	45-59	52	W/m °C
Velocidad del aire en los bolsillos.	80	80	m/s
Calor transferido al papel.		3859.855	KW
Vapor a secadores.		7.625	Ton/hr
Consumo de vapor por cantidad de agua evaporada.		1.319	KgVap/KgH ₂ O
Perdidas de calor total en cilindros secadores.		2092.922	KW
Vapor total a cilindros secadores	45.4	41.1	Ton/hr
Eficiencia		91.35	%

Se graficaron los valores de humedad específica del papel versus número de cilindro secador en la sección de post-secado; los puntos azules representan los valores calculados con el programa y los rojos representan los valores medidos en operación. Gráfica 9.

Gráfica 9. Humedad específica del papel versus número de cilindro secador (post-secado)



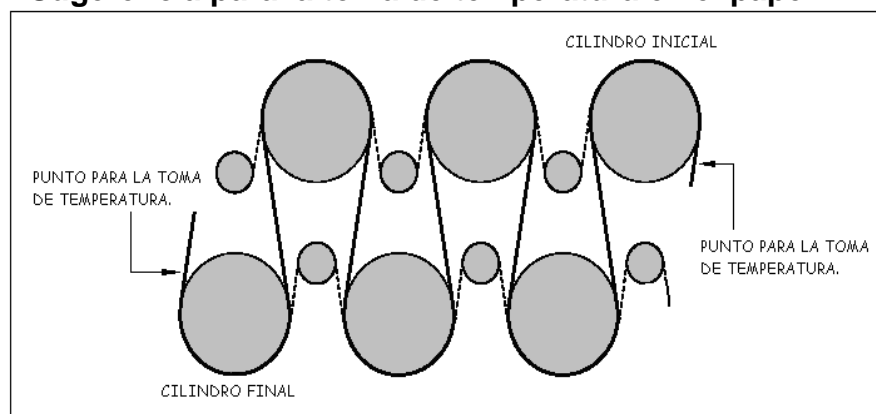
Debido a que la sección de post-secado es demasiado corta con respecto a la sección de pre-secado, en esta gráfica solo es posible identificar dos zonas: la zona de calentamiento y la de evaporación constante; la primera se identifica porque el cambio de humedad del papel en los primeros tres cilindros secadores es despreciable y la segunda por una pendiente constante que se mantiene hasta el final de esta sección.

10. CONCLUSIONES

✓ El modelo desarrollado está basado en los principios de termodinámica y transferencia de calor; por lo tanto, se desprecian los fenómenos de transferencia de masa; razón por la cual, no se tienen en cuenta la evaporación del agua del papel, que tiene lugar en los espacios abiertos entre los cilindros secadores, ni la posible re-humectación del papel, entre otros fenómenos que requieran de conceptos de esta área.

✓ Mediante la aplicación de este modelo se obtienen resultados muy confiables, siempre y cuando se haga una recolección apropiada de datos, principalmente de temperatura del papel. La medición de esta temperatura se debe hacer sobre una misma cara del papel antes y después del primer y último cilindro secador que compone cada grupo de secadores; al mismo tiempo que se debe verificar el incremento de la temperatura conforme avanza en la dirección longitudinal de la máquina de papel.

Figura 70. Sugerencia para la toma de temperatura en el papel.



✓ Aumentar la temperatura del aire que se introduce en los bolsillos, asegura puntos de rocío mas altos, fuerzas de evaporación o transferencia altas debido a la diferencia de presión entre el papel y el aire evitando así la re-humectación del mismo y mejoras en el perfil, a la vez que reduce las pérdidas de calor desde las superficies del cilindro secador con la consecuente disminución en el consumo de vapor. Un incremento del 10% en la temperatura del aire reduce entre 3 y 4% el consumo de vapor, a la vez que reduce las pérdidas de calor por las superficies de los cilindros secadores en aproximadamente un 19 y 20%.

- ✓ Se obtuvo que para un incremento de 1% en la sequedad del papel en la sección de prensas el consumo de vapor se reduce entre 4 y 5%.
- ✓ Incrementos del 10% en la temperatura de la hoja en la entrada de cada sección de secado, disminuye aproximadamente 5% el consumo de vapor. Dicho incremento se logra mediante la utilización de duchas de vapor en la sección de formado de la hoja de papel o mediante el prensado caliente, el cual consiste en el calentamiento interno de los rodillos (temperatura superficial de los rodillos menor a 100°C).
- ✓ La máquina de papel se encuentra operando económicamente; al comparar el consumo de vapor de la máquina de papel número cuatro (4), de 1.295 Kg Vapor/KgH₂O evaporada con el valor de 1.3 Kg Vapor/KgH₂O evaporada, valor típico en las máquinas de papel multi-cilindros.
- ✓ Mantener el Hood totalmente cerrado disminuye el volumen de aire frío que entra en este, con la consecuente disminución de las pérdidas debidas a la transferencia de calor hacia esta masa de aire; estas pérdidas corresponden al 2-3% del calor total suministrado
- ✓ Solo cerca del 26% de la energía contenida en la masa de aire húmedo que se extrae de la campana, es recuperada mediante el precalentamiento del aire que se insufla en los bolsillos de la máquina, lo cual puede representar pérdidas monetarias para la empresa. Para aumentar la recuperación, se suele rociar agua contra el flujo de aire húmedo después de realizado el intercambio térmico con el aire fresco, para forzar la condensación del vapor de agua que contiene este volumen de aire; esta técnica es recomendada siempre y cuando el agua tibia, producto de la condensación sea aprovechada en el proceso.
- ✓ Se tienen un consumo energético de 408 KW, en el calentamiento del aire que se sopla bajo techo para evitar condensaciones. Mediante la implementación de sistemas para la vigilancia de las condiciones del aire, tanto en el exterior como en el interior del edificio, se podría ahorrar esta cantidad de energía de modo que en los periodos cálidos, no se agregue calor al aire, pues se encontró que para un día cálido con una temperatura de bulbo seco de 37.1°C y bulbo húmedo de 22.1°C la temperatura de bulbo seco y húmedo del aire en el interior del edificio era de 36°C y 29.3 °C, para estas condiciones se requiere que la temperatura para el sople de aire bajo techo sea de 34 °C que es menor incluso a la temperatura del aire en el interior del edificio; razón por la cual la adición de calor al aire, bajo estas condiciones, es innecesaria.

BIBLIOGRAFIA

ASTM INTERNATIONAL. Standard Practice for estimate of heat gain or loss and the surface temperatures of insulated flat, cylindrical, and spherical systems by use of computer programs. 2006. 22 p.

Best practices in paper dryers operations [en línea]. Westford, Massachusetts: Kadant Johnson, 2007. [Consultado 02 de Julio de 2007]. Disponible en Internet: <http://www.kadantjohnson.com>.

ÇENGEL, Yunus A. Termodinámica. 4 ed. México: McGraw-Hill, 2003. 829 p.

_____. Transferencia de calor. 2 ed. México: McGraw-Hill, 2004. 793 p.

DIAZ ALBEDI, Pablo. Estudio de eficiencia de batería de secado. Propal S.A. Colombia, 1989. Conferencia.

HEIKKILÄ, Pertti. A study on the drying process of pigment coated paper webs. Finland, 1993. 300 p. PhD thesis (Doctor). Abo Akademi. Department of Chemical Engineering.

Hybrid modelling of paper machine grade changes [en línea]. Helsinki: Universite de Technologie D'Helsinki, 2004. [Consultado 15 de agosto de 2007]. Disponible en Internet en: <http://lib.tkk.fi/Diss/2004/isbn9512271362/isbn9512271362.pdf>

LIBBY, C. Earl. Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel. Tomo 2. 10 ed. México: Continental, 1984. 514 p.

Manual Duo-Stabilizer. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda., 2007. 200 p.

Manual S-Stabilizer. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda., 2007. 200 p.

Manual STA7700034. Operation and Maintenance Guidelines for Air, Steam, & Condensate Systems. Finland: METSO PAPER, 2002. 143 p.

Manual vapor y condensado. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda., 2007. 200 p.

PERSSON, H. Dynamic modelling and simulation of multi-cylinder paper dryers. Sweden, 1998. 320 p. Licentiate thesis (licentiate). Lund University. Department of Chemical Engineering.

Plano 1937-001419B. Esquema de flujos. Brasil: Voith paper maquinas y equipamentos Ltda., 2007.

RENDINA, Alfredo. Capacidad de secado en baterías de secadores. En: acotepac. Vol. 15, No. 41 (Jul. – Dic. 2006); p. 3 - 8.

SLÄTTEKE, Ola. Modelling and control of the paper machine drying section. Sweden, 2006. 252 p. Doctoral Dissertation (Doctor). Lund institute of technology. Department of Automatic Control.

SMOOK, Gary A. Handbook for pulp and paper technologists. 2 ed. Canada: Angus Wilde Publications, 1992. 419 p.

Steam Engineering tutorials [en línea]. Argentina: Spirax Sarco, 2007. [Consultado 12 de Agosto de 2007]. Disponible en Internet:
<http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials.asp>

SUAREZ, Mauricio Andrés. Modelo para el cálculo de consumo de vapor en maquinas multi-cilindros. En: acotepac. Vol. 12, No. 34 (Ene. – Jun. 2003); p. 3 -6.

TIP 0404-07. Paper machine drying rate, Canada: TAPPI. 2005. 28 p.

Termodinámica 2005 [en línea]: Aire húmedo. Argentina: uncoma, 2007. [Consultado 13 de junio de 2007]. Disponible en Internet:
http://fain.uncoma.edu.ar/prof_tec/mecanic/termodin/aire_humedo_2005_1.pdf

ANEXOS

Anexo A. Emisividad de los materiales más comunes

Valores de emisividad de materiales comunes	
<i>Material</i>	<i>Emisividad^a</i>
Aluminio, pulido	0,05
Aluminio, superficie rugosa	0,07
Aluminio, muy oxidado	0,25
Placa de amianto	0,96
Tela de amianto	0,78
Papel de amianto	0,94
Pizarra de amianto	0,96
Latón, mate, deslustrado	0,22
Latón, pulido	0,03
Ladrillo, común	0,85
Ladrillo, vidriado, basto	0,85
Ladrillo, refractario, basto	0,94
Bronce, poroso, basto	0,55
Bronce, pulido	0,1
Carbono, purificado	0,8
Hierro fundido, fundición esbozada	0,81
Hierro fundido, pulido	0,21
Carbón, en polvo	0,96
Cromo, pulido	0,1
Arcilla, cocida	0,91
Hormigón	0,54
Cobre, pulido,	0,01
Cobre, bruñido comercial	0,07
Cobre, oxidado	0,65
Cobre, negro oxidado	0,88

Cinta aislante, plástico negro	0,95
Esmalte **	0,9
Formica	0,93
Terreno congelado	0,93
Vidrio	0,92
Vidrio, escarchado	0,96
Oro, pulido	0,02
Hielo	0,97
Hierro, laminado en caliente	0,77
Hierro, oxidado	0,74
Hierro, chapa galvanizada, bruñido	0,23
Hierro, chapa, galvanizado, oxidado	0,28
Hierro, brillante, grabado	0,16
Hierro, forjado, pulido	0,28
Barniz, Bakelite	0,93
Barniz, negro, mate	0,97
Barniz, negro, brillante	0,87
Barniz, blanco	0,87
Hollín	0,96
Plomo, gris	0,28
Plomo, oxidado	0,63
Plomo, rojo, en polvo	0,93
Plomo, brillante	0,08
Mercurio, puro	0,1
Níquel, en hierro fundido	0,05
Níquel, puro pulido	0,05
Pintura, acabado en plata**	0,31
Pintura, óleo, media	0,94
Papel, negro, brillante	0,9
Papel, negro, mate	0,94
Papel, blanco	0,9

Platino, puro, pulido	0,08
Porcelana, vidriada	0,92
Cuarzo	0,93
Goma	0,93
Laca, negra, mate	0,91
Laca, negra, brillante	0,82
Nieve	0,8
Acero, galvanizado	0,28
Acero, muy oxidado	0,88
Acero, recién laminado	0,24
Acero, superficie rugosa	0,96
Acero, rojo oxidado	0,69
Acero, chapa, niquelado	0,11
Acero, chapa, laminado	0,56
Papel de alquitrán	0,92
Estaño, bruñido	0,05
Tungsteno	0,05
Agua	0,98
Cinc, chapa	0,2

Anexo B. Propiedades térmicas de algunos elementos metálicos

ELEMENTO	Conductividad térmica κ (W/m ² K), a la temperatura de:							Propiedades a 20°C				
	200°K	273°K	400°K	600°K	800°K	1000°K	1200°K	ρ Kg/m ³	c_p kJ/kg°C	k W/m.°K	$\alpha \times 10^6$ m ² /seg	T.fusión °K
Aluminio	237,0	236,0	240,0	232,0	220,0			2702	896	236,0	97,5	933
Antimonio	30,2	25,5	21,2	18,2	16,8			6684	208	24,6	17,7	904
Berilio	301,0	218,0	161,0	126,0	107,0	89,0	73,0	1850	1750	205,0	63,3	1550
Bismuto	9,7	8,2						9780	124	7,9	6,5	545
Boro	52,5	31,7	18,7	11,3	8,1	6,3	5,2	2500	1047	28,6	10,9	2573
Cadmio	99,3	97,5	94,7					8650	231	97,0	48,5	594
Cesio	36,8	36,1						1873	230	36,0	83,6	302
Cromo	111,0	94,8	87,3	80,5	71,3	65,3	62,4	7160	440	91,4	29,0	2118
Cobalto	122,0	104,0	84,8					8862	389	100,0	29,0	1765
Cobre	413,0	401,0	392,0	383,0	371,0	357,0	342,0	8933	383	399,0	116,6	1356
Germanio	96,8	66,7	43,2	27,3	19,8	17,4	17,4	5360	61,6			1211
Oro	327,0	318,0	312,0	304,0	292,0	278,0	262,0	19300	129	316,0	126,9	1336
Hafnio	24,4	23,3	22,3	21,3	20,8	20,7	20,9	13280	23,1			2495
Indio	89,7	83,7	74,5					7300	82,2			430
Iridio	153,0	148,0	144,0	138,0	132,0	126,0	120,0	22500	134	147,0	48,8	2716
Hierro	94,0	83,5	69,4	54,7	43,3	32,6	28,2	7870	452	81,1	22,8	1810
Plomo	36,6	35,5	33,8	31,2				11340	129	35,3	24,1	601
Litio	88,1	79,2	72,1					534	3391	77,4	42,7	454
Magnesio	159,0	157,0	153,0	149,0	146,0			1740	1017	156,0	88,2	923
Manganeso	7,2	7,7						7290	486	7,8	2,2	1517
Mercurio	28,9							13546				234
Molibdeno	143,0	139,0	134,0	126,0	118,0	112,0	105,0	10240	251	138,0	53,7	2883
Níquel	106,0	94,0	80,1	65,5	67,4	71,8	76,1	8900	446	91,0	22,9	1726
Niobio	52,6	53,3	55,2	58,2	61,3	64,4	67,5	8570	270	53,6	23,2	2741
Paladio	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5		12020	247	75,5	25,4	1825
Platino	72,4	71,5	71,6	73,0	75,5	78,6	82,6	21450	133	71,4	25,0	2042
Potasio	104,0	104,0	52,0					860	741	103,0	161,6	337
Renio	51,0	48,6	46,1	44,2	44,1	44,6	45,7	21100	137	48,1	16,6	3453
Rodio	154,0	151,0	146,0	136,0	127,0	121,0	115,0	12450	248	150,0	48,6	2233
Rubidio	58,9	58,3						1530	348	58,2	109,3	312
Silicio	264,0	168,0	98,9	61,9	42,2	31,2	25,7	2330	703	153,0	93,4	1685
Plata	403,0	428,0	420,0	405,0	389,0	374,0	358,0	10500	234	427,0	173,8	1234
Sodio	138,0	135,0						971	1206	133,0	113,6	371
Tántalo	57,5	57,4	57,8	58,6	59,4	60,2	61,0	16600	138	57,5	25,1	3269
Estaño	73,3	68,2	62,2					5750	227	67,0	51,3	505
Titanio	24,5	22,4	20,4	19,4	19,7	20,7	22,0	4500	611	22,0	8,0	1953
Tungsteno	197,0	182,0	162,0	139,0	128,0	121,0	115,0	19300	134	179,0	69,2	3653
Uranio	25,1	27,0	29,6	34,0	38,8	43,9	49,0	19070	113	27,4	12,7	1407
Vanadio	31,5	31,3	32,1	34,2	36,3	38,6	41,2	6100	502	31,4	10,3	2192
Cinc	123,0	122,0	116,0	105,0				7140	385	121,0	44,0	693
Circonio	25,2	23,2	21,6	20,7	21,6	23,7	25,7	6570	272	22,8	12,8	2125

Anexo C. Propiedades térmicas de algunas aleaciones

Propiedades a 20°C		Densidad ρ Kg/m³	Calor especif J/kg°C	Conduct. k W/m°C	Difusiv. α × 10⁵ m²/seg	Conductividad térmica en (W/m°C) a la temperatura en °C:									
Aleaciones	Composición					-100	0°C	100	200	300	400	600	800	1000	
Duraluminio	94-96% Al; 3-5% Cu	2787	833	164	6,680	126	159	182	194						
Siluminio	87% Al; 1,33% Si	2659	871	164	7,100	119	137	144	152	161					
Alusil	80% Al; 20% Si	2627	854	161	7,172	144	157	168	175	178					
Al-Mg-Si	97% Al; 1% Mg; 1% Si	2707	8922	177	7,311		175	189	204						
Bronce de aluminio	95% Cu; 5% Al	8666	410	83	2,330										
Bronce	75% Cu; 25% Sn	8666	343	26	0,860										
Latón rojo	85% Cu; 9% Sn; 6% Zn	8714	385	61	1,804		59	71							
Latón	70% Cu; 30% Zn	8522	385	111	3,412	88		128	144	147	147				
Plata alemana	62% Cu; 15% Ni; 22% Zn	8618	394	24,9	0,733	19,2		31	40	45	48				
Constantán	60% Cu; 40% Ni	8922	410	22,7	0,612	21		22	26						
Fundición	4% C	7272	420	52	1,702										
Acero al carbono	0,5% C	7833	465	54	1,474		55	52	48	45	42	35	31	29	
	1% C	7801	473	43	1,172		43	43	42	40	36	33	29	28	
	1,5% C	7753	486	36	0,970		36	36	36	35	33	31	28	28	
Acero al cromo	1% Cr	7865	460	61	1,665		62	55	52	47	42	36	33	33	
	5% Cr	7833	460	40	1,110		40	38	36	36	33	29	29	29	
	20% Cr	7689	460	40	1,11		22	22	22	22	24	24	26	29	
Acero al níquel	10% Ni	7945	460	26	0,720										
	20% Ni	7993	460	19	0,526										
	40% Ni	8169	460	10	0,279										
	60% Ni	8378	460	19	0,493										
	80% Ni	8618	0,46	35	0,872										
	Invar 36% Ni	8,137	460	10,7	0,286										
Acero al Cr-Ni	15% Cr; 10% Ni	7865	460	19	0,526										
	15% Cr; 40% Ni	8073	460	11,6	0,305										
	18% Cr; 8% Ni	7817	460	16,3	0,444		16	17	17	19	19	22	27	31	
	20% Cr; 15% Ni	7833	460	15,1	0,415										
	25% Cr; 20% Ni	7865	460	12,8	0,361										
	80% Cr; 15% Ni	8522	460	17	0,444										
Acero al manganes	1% Mn	7865	460	50	1,388										
	5% Mn	7849	460	22	0,637										
Acero al silicio	1% Si	7769	460	42	1,164										
	5% Si	7417	460	19	0,555										
Acero al tungsteno	1% W	7913	448	66	1,858										
	5% W	8073	435	54	1,525										
	10% W	8314	419	48	1,391										
Ni-Cr	90% Ni; 10% Cr	8666	444	17	0,444		17	19	21	23	25				
	80% Ni; 20% Cr	8314	444	12,6	0,343		12	14	16	17	18	23			
Mg-Al; electrol.	Mg; 7 % Al; 1,5% Zn;	1810	1000	66	3,605		52	62	74	83					

Anexo D. Datos de operación (Septiembre 05 2007)

Datos Generales		Speed Sizer	
Velocidad maquina (m/min)	680	Apresto RM (l/min)	800
Ancho del papel (m)	6,19	Apresto RF (l/min)	830
Gramaje o peso del papel (g/m ²)	75,24	% sólidos	8,4
Diámetro de cilindro secador	1,5	Factor consumo	0,06
Producción		Cantidad de apresto en la hoja (l/min)	97,8
Ton/día	456,048	Cantidad de sólidos en apresto (Kg/s)	0,137
Ton/hr	19.002	Cantidad de agua en la hoja (Kg/s)	1,542
Kg/s	5,278	% seco	74,7
Vapor a secadores	39,5	Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	0,339
Prensas		Temperatura Hoja entrando °C	81,6
% seco	39,5	Temperatura Hoja Saliendo °C	42,5
Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	1,532	Post-secado	
Temperatura Hoja	49,3	% seco	96,04
Pre-secado		Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	0,041
% seco	96,04	Temperatura Hoja	87,1
Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	0,041	agua evaporada [Kg/s]	1,566
Temperatura Hoja	98,1	No Cilindros en contacto directo	12
agua evaporada [Kg/s]	7,846	Rata de evaporación [Kg/hr m ²]	30.074
No Cilindros en contacto directo	38		
Rata de evaporación [Kg/hr m ²]	49.34		

Cilindros	Temperatura saturación	Temperatura superficie secador	Temperatura papel, e	Temperatura papel, s	Presión operación [barg]	Delta presión [barg]	Área secador [m^2]	Long arco de contacto papel [mm]	Factor de contacto
1	98,21	76,8	49,3	52,2	-0,06	0,3	30,63	760	0,15
2	114,53	80,2	52,2	55,8	0,67	0,27	30,63	2413	0,49
3	96,42	69,8	55,8	59,6	-0,12	0,26	30,63	2888	0,58
4	114,53	77,6	59,6	59,6	0,67	0,27	30,63	2888	0,58
5	91,8	67	89,6	64,4	-0,26	0,18	30,63	2888	0,58
6	114,53	69	64,4	62	0,67	0,27	30,63	2888	0,58
7	102,38	76,8	62	70,1	0,1	0,3	30,63	2888	0,58
8	114,53	71,6	70,1	65,9	0,67	0,27	30,63	2888	0,58
9	105,24	74,5	65,9	71,4	0,22	0,3	30,63	2526	0,51
10	114,53	72	71,4	65,1	0,67	0,27	30,63	2146	0,43
11	114,53	82,9	65,1	78,5	0,67	0,31	30,63	2852	0,58
12	114,53	87,6	78,5	70,3	0,67	0,27	30,63	2380	0,48
13	114,53	86	70,3	78,1	0,67	0,31	30,63	2380	0,48
14	114,53	88,5	78,1	71,1	0,67	0,27	30,63	2380	0,48
15	114,53	84,6	71,1	81,6	0,67	0,31	30,63	2380	0,48
16	114,53	81,3	81,6	71,1	0,67	0,27	30,63	2380	0,48
17	114,53	86,6	71,1	74,9	0,67	0,31	30,63	2084	0,42
18	122,76	87,5	74,9	83,1	1,17	0,3	30,63	2156	0,44
19	122,76	97,1	79,6	86,9	1,17	0,3	30,63	2285	0,46
20	122,76	92,1	86,5	88,1	1,17	0,3	30,63	2380	0,48
21	122,76	98,2	76	88,4	1,17	0,3	30,63	2285	0,46
22	122,76	94,3	87,5	87,7	1,17	0,3	30,63	2380	0,48
23	122,76	97,5	84,7	89,1	1,17	0,3	30,63	2285	0,46
24	122,76	93,9	84,6	85,8	1,17	0,3	30,63	2380	0,48
25	122,76	105,8	82,4	88,1	1,17	0,3	30,63	2285	0,46
26	122,76	102,8	86,7	87,9	1,17	0,3	30,63	2380	0,48
27	122,76	96,7	84	87,5	1,17	0,3	30,63	2285	0,46
28	122,76	99,6	83,1	85,3	1,17	0,3	30,63	2380	0,48
29	122,76	99,2	78,6	87,8	1,17	0,3	30,63	2084	0,42
30	129,89	96,8	77,9	86,8	1,68	0,3	30,63	2156	0,44

31	129,89	99,7	82,2	88,2	1,68	0,3	30,63	2285	0,46
32	129,89	104,4	88,5	86	1,68	0,3	30,63	2444	0,49
33	129,89	101,2	81,5	86,6	1,68	0,3	30,63	2285	0,46
34	129,89	103	84,5	88,7	1,68	0,3	30,63	2444	0,49
35	129,89	96,5	82,3	86,8	1,68	0,3	30,63	2285	0,46
36	129,89	101	84,7	88,3	1,68	0,3	30,63	2444	0,49
37	129,89	105,2	82,1	87,9	1,68	0,3	30,63	2285	0,46
38	129,89	100,2	81,6	86,2	1,68	0,3	30,63	2444	0,49
39	129,89	106	79,7	84,6	1,68	0,3	30,63	2285	0,46
40	129,89	99,9	82,2	83,4	1,68	0,3	30,63	2444	0,49
41	129,89	98,8	79,8	90,2	1,68	0,3	30,63	2100	0,42
42	129,89	89,9	78,5	90,2	1,68	0,3	30,63	2021	0,41
43	129,89	105,1	78,9	90,5	1,68	0,3	30,63	2356	0,48
44	129,89	90,2	87,5	93,9	1,68	0,3	30,63	2461	0,50
45	129,89	102,3	88,3	96,6	1,68	0,3	30,63	2888	0,58
46	129,89	103,7	94,5	98,9	1,68	0,3	30,63	2461	0,50
47	129,89	105,2	91,3	98,1	1,68	0,3	30,63	2888	0,58
49	102,14	67,2	42,5	62,7	0,09	0,19	30,63	2888	0,58
50	111,46	57,4	58,2	55,8	0,5		30,63	2380	0,48
51	103,57	80,7	54,4	73,1	0,15	0,18	30,63	2385	0,48
52	120,95	86,6	66,9	79,4	1,04	0,3	30,63	2156	0,44
53	120,95	87,7	74,4	85,2	1,04	0,3	30,63	2888	0,58
54	120,95	95,6	82,4	88,3	1,04	0,3	30,63	2380	0,48
55	120,95	93,3	78,7	85,8	1,04	0,3	30,63	2888	0,58
56	120,95	96,1	84,2	89,2	1,04	0,3	30,63	2380	0,48
57	120,95	95,1	81,2	92,1	1,04	0,3	30,63	2888	0,58
58	120,95	102,7	88,5	94,6	1,04	0,3	30,63	2380	0,48
59	120,95	98,2	85,6	96,7	1,04	0,3	30,63	2888	0,58
60	120,95	98,7	95,2	102,4	1,04	0,3	30,63	2380	0,48
61	120,95	77,7	93,3	87,1	1,04	0,3	30,63	2236	0,45

Anexo E. Datos de operación (Octubre 06 2007)

Datos Generales		Speed Sizer	
Velocidad maquina (m/min)	660	Apresto RM (l/min)	750
Ancho del papel (m)	6,19	Apresto RF (l/min)	750
Gramaje o peso del papel (g/m ²)	75,04	% sólidos	8
Diámetro de cilindro secador	1,5	Factor consumo	0,063
Producción		Cantidad de apresto en la hoja (l/min)	94,5
Ton/día	441,459	Cantidad de sólidos en apresto (Kg/s)	0,126
Ton/hr	18.394	Cantidad de agua en la hoja (Kg/s)	1,496
Kg/s	5,109	% seco	74,7
Vapor a secadores	42.7	Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	0,339
Prensas		Temperatura Hoja entrando °C	97.3
% seco	39,5	Temperatura Hoja Saliendo °C	45.8
Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	1,532	Post-secado	
Temperatura Hoja	33.9	% seco	95.95
Pre-secado		Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	0,042
% seco	96.05	Temperatura Hoja	96.8
Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	0,041	agua evaporada [Kg/s]	1,517
Temperatura Hoja	99.6	No Cilindros en contacto directo	12
agua evaporada [Kg/s]	7,618	Rata de evaporación [Kg/hr m ²]	29.14
No Cilindros en contacto directo	38		
Rata de evaporación [Kg/hr m ²]	47.902		

Bolsillo	Temperatura papel [°C]	Temperatura aire [°C]	Temp bulbo húmedo [°C]	Presión saturación [KPa]	Presión saturación adiabática [KPa]	Humedad saturación [KgH ₂ O/Kg Aire]	Humedad absoluta [KgH ₂ O/Kg Aire]	Humedad relativa	Presión parcial del vapor en el aire [KPa]	punto de rocío [°C]	presión parcial de vapor [mmHg]	Presión vapor papel [mmHg]
2	40,8	57,3	33,1	17,600	5,054	0,037	0,026	0,209	3,676	27,567	27,570	57,775
3	49,4	46,2	37	10,206	6,276	0,047	0,042	0,564	5,756	35,428	43,171	89,974
4	50,5	64,4	37,5	24,405	6,449	0,048	0,036	0,202	4,933	32,671	37,001	95,032
5	49,7	48,5	39,8	11,467	7,302	0,055	0,051	0,594	6,815	38,515	51,115	91,330
6	50,7	64,2	40,1	24,187	7,421	0,056	0,045	0,251	6,072	36,399	45,547	95,977
7	57,7	51,4	42,9	13,245	8,605	0,066	0,062	0,614	8,134	41,828	61,007	134,526
8	56,8	61	40,7	20,911	7,662	0,058	0,049	0,312	6,528	37,723	48,965	128,930
9	65,6	49,2	38,4	11,876	6,772	0,051	0,046	0,519	6,164	36,673	46,237	193,151
10	61,2	60	44,5	19,968	9,352	0,072	0,065	0,426	8,498	42,662	63,744	158,293
11	76,1	51,8	46,9	13,508	10,576	0,083	0,080	0,763	10,309	46,398	77,327	303,430
12	65,4	60	46,9	19,968	10,576	0,083	0,077	0,494	9,863	45,533	73,979	191,437
13	72,9	55	51	15,776	12,987	0,105	0,103	0,810	12,774	50,665	95,813	265,294
14	67,4	61	50,2	20,911	12,483	0,100	0,095	0,569	11,905	49,249	89,297	209,178
15	71,7	57	53,3	17,353	14,534	0,120	0,118	0,826	14,340	53,024	107,560	252,076
16	65,5	60	49,3	19,968	11,936	0,095	0,090	0,569	11,361	48,315	85,211	192,293
17	70,1	57	53	17,353	14,324	0,118	0,116	0,813	14,114	52,697	105,862	235,320
18	72	72	55,2	34,041	15,928	0,134	0,125	0,442	15,062	54,037	112,972	255,327
19	74,4	75,5	67,7	39,457	28,258	0,285	0,280	0,707	27,913	67,420	209,363	282,634
20	74	86,1	72,1	60,477	34,186	0,381	0,371	0,556	33,619	71,708	252,161	277,919
21	76,8	77,4	71,2	42,688	32,895	0,358	0,354	0,765	32,639	71,018	244,810	312,360
22	74,4	86,5	75,2	61,425	38,966	0,475	0,466	0,627	38,542	74,939	289,092	282,634
23	80,7	80	72,3	47,470	34,479	0,386	0,381	0,720	34,168	72,087	256,282	366,263
24	69,4	86	77,1	60,242	42,164	0,548	0,541	0,695	41,849	76,919	313,897	228,291
25	71,2	78,2	72,4	44,114	34,626	0,389	0,385	0,780	34,392	72,241	257,965	246,735

26	71,3	86	75,7	60,242	39,787	0,493	0,484	0,654	39,407	75,470	295,574	247,795
27	73,6	79	73,1	45,580	35,671	0,408	0,404	0,777	35,437	72,945	265,800	273,271
28	76	86,3	75,7	60,949	39,787	0,493	0,484	0,646	39,396	75,463	295,491	302,172
29	73,7	66,1	54,8	26,331	15,626	0,131	0,125	0,571	15,041	54,008	112,814	274,427
30	73,6	80,3	61,5	48,049	21,396	0,194	0,183	0,426	20,486	60,554	153,656	273,271
31	76	74,4	64	37,681	23,970	0,226	0,220	0,623	23,482	63,544	176,130	302,172
32	73,7	84,4	64,5	56,584	24,515	0,233	0,221	0,417	23,588	63,644	176,928	274,427
33	84,1	76	64,5	40,286	24,515	0,233	0,226	0,595	23,979	64,008	179,860	419,427
34	85,8	84,3	70	56,361	31,238	0,331	0,321	0,543	30,631	69,547	229,754	448,342
35	81	76,2	64,5	40,622	24,515	0,233	0,226	0,590	23,970	64,000	179,790	370,714
36	85,1	84,1	67,6	55,919	28,135	0,283	0,272	0,490	27,402	67,001	205,535	436,240
37	87,4	76,3	62,3	40,791	22,193	0,204	0,195	0,528	21,521	61,627	161,424	477,062
38	78,9	86,2	68,4	60,713	29,139	0,298	0,286	0,467	28,360	67,782	212,718	340,488
39	71	76,1	62,7	40,454	22,601	0,209	0,201	0,543	21,961	62,070	164,722	244,625
40	85,1	83	65,1	53,537	25,183	0,242	0,231	0,455	24,357	64,355	182,690	436,240
41	74,3	57	45,1	17,353	9,646	0,075	0,069	0,518	8,992	43,744	67,448	281,449
42	78,3	75,4	51,5	39,292	13,311	0,108	0,096	0,307	12,044	49,481	90,340	332,243
43	75,2	75,5	56,5	39,457	16,947	0,144	0,134	0,405	15,978	55,264	119,842	292,266
44	77	88,1	62,4	65,341	22,295	0,205	0,190	0,322	21,064	61,159	157,992	314,952
45	80	80,1	60,6	47,662	20,529	0,184	0,173	0,411	19,575	59,571	146,824	356,051
46	88,4	90,8	59,3	72,424	19,330	0,170	0,153	0,245	17,767	57,500	133,265	495,780
47	84,2	79	53,8	45,580	14,890	0,123	0,111	0,298	13,577	51,903	101,836	421,083
49	63,9	62,4	39,5	22,295	7,186	0,054	0,044	0,265	5,902	35,883	44,271	178,983
50	60,6	50,9	39,3	12,923	7,109	0,053	0,048	0,500	6,458	37,525	48,439	153,982
51	67,3	76,5	48	41,131	11,182	0,088	0,075	0,234	9,641	45,089	72,311	208,259
52	79,3	74,3	54,5	37,523	15,402	0,128	0,118	0,383	14,375	53,074	107,822	346,080
53	84,6	85,8	52,6	59,774	14,047	0,115	0,098	0,206	12,303	49,907	92,277	427,764
54	86,7	75,4	56,4	39,292	16,866	0,143	0,133	0,405	15,896	55,158	119,233	464,313

55	88,6	85,5	59	59,078	19,061	0,167	0,153	0,300	17,742	57,470	133,079	499,597
56	88,2	78,2	51	44,114	12,987	0,105	0,091	0,262	11,541	48,629	86,567	491,988
57	91,8	84,5	53,6	56,807	14,747	0,122	0,106	0,231	13,135	51,229	98,518	564,075
58	91	79,4	51,1	46,328	13,051	0,105	0,092	0,249	11,548	48,641	86,619	547,340
59	80	81,3	51,9	50,024	13,575	0,110	0,096	0,240	12,022	49,444	90,170	356,051
60	96,8	72,4	49,8	34,626	12,237	0,098	0,087	0,318	11,027	47,723	82,707	678,624

Anexo F. Datos de producción (Octubre 12 2007)

Datos Generales	
Velocidad máquina (m/min)	709
Ancho del papel (m)	6,19
Gramaje o peso del papel (g/m2)	57.8
Diámetro de cilindro secador	1,5
Producción	
Ton/día	365.281
Ton/hr	15.22
Kg/s	4.228
Vapor a secadores	19.4
Prensas	
% seco	39,5
Humedad absoluta (KgH2O/Kg papel)	1,532
Temperatura Hoja	34.2
Pre-secado	
% seco	91.77
Humedad absoluta (KgH2O/Kg papel)	0,0897
Temperatura Hoja	54.4
agua evaporada [Kg/s]	6.098
No Cilindros en contacto directo	38
Rata de evaporación [Kg/hr m^2]	38.347

Speed Sizer	
Apresto RM (l/min)	-
Apresto RF (l/min)	-
% sólidos	-
Factor consumo	-
Cantidad de apresto en la hoja (l/min)	-
Cantidad de sólidos en apresto (Kg/s)	-
Cantidad de agua en la hoja (Kg/s)	-
% seco	-
Humedad absoluta (KgH2O/Kg papel)	-
Temperatura Hoja entrando °C	-
Temperatura Hoja Saliendo °C	42.1
Post-secado	
% seco	94.45
Humedad absoluta (KgH2O/Kg papel)	0,0589
Temperatura Hoja	54.4
agua evaporada [Kg/s]	0.130
No Cilindros en contacto directo	12
Rata de evaporación [Kg/hr m^2]	2.5

Cilindro secador	Temperatura saturación del vapor [°C]	Temperatura superficie secador [C]	Presión operación [Barg]	Temperatura del papel [°C]
1	103	45,2	0,11	34,2
2	114	72	0,6	33,4
3	103	62,5	0,1	38,8
4	114	73,2	0,6	47,3
5	99	67,2	-0,02	48,6
6	114	64	0,6	53,8
7	104	71,7	0,14	53,2
8	114	63,2	0,6	60,8
9	106	68	0,22	58,6
10	114	67,3	0,6	66,5
11	114	79	0,6	61,7
12	114	77,2	0,6	74,4
13	114	79,6	0,6	64,1
14	114	81	0,6	73
15	114	86,3	0,6	64,6
16	114	81,9	0,6	71,9
17	114	72,4	0,6	68,6
18	122	88	1,11	72,5
19	122	90,7	1,11	71,3
20	122	98,3	1,11	84,7
21	122	104,7	1,11	77
22	122	96,9	1,11	84
23	122	100,6	1,11	73,3
24	122	93,6	1,11	76,1
25	122	107,2	1,11	80,3
26	122	95,3	1,11	78,5
27	122	103	1,11	76
28	122	92,6	1,11	85,8
29	122	100,8	1,11	83
30	104	81,8	0,14	71
31	104	83,9	0,14	69,1
32	104	82,1	0,14	71,4
33	104	89,6	0,14	70,6
34	104	84,8	0,14	72,3
35	104	88,5	0,14	69,6
36	104	88,9	0,14	71,8
37	104	89,2	0,14	68
38	104	87	0,14	69
39	104	86,2	0,14	72,4
40	104	83,8	0,14	70,6
41	104	71,9	0,14	68,6
42	104	82,2	0,14	61,7
43	104	91,3	0,14	70
44	104	79,6	0,14	73,6

45	104	90,5	0,14	76
46	104	86,5	0,14	77,7
47	104	92,2	0,14	73,1
49	98	47	-0,07	42,1
50	90	50,7	-0,3	43
51	102	57	0,08	44
52	101	51,1	0,04	48,3
53	102	70,3	0,08	56,6
54	101	62,4	0,04	54
55	102	69,3	0,08	59,6
56	101	65	0,04	56
57	102	70,2	0,08	60,9
58	101	62,1	0,04	57,7
59	102	71,7	0,08	59,1
60	101	62,7	0,04	54,2
61	102	62,3	0,08	54,4

Anexo G. Datos de producción (Noviembre 10 2007)

Datos Generales		Pre-secado	
Velocidad maquina (m/min)	709.8	% seco	93.45
Ancho del papel (m)	6,19	Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	0,07
Gramaje o peso del papel (g/m ²)	75.57	Temperatura Hoja	98.9
Diámetro de cilindro secador	1,5	agua evaporada [Kg/s]	8.091
Producción		No Cilindros en contacto directo	38
Ton/día	478.122	Rata de evaporación [Kg/hr m ²]	50.879
Ton/hr	19.922	Post-secado	
Kg/s	5.534	% seco	96.05
Vapor a secadores [Ton/hr]	45.4	Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	0,041
Prensas		Temperatura Hoja	95.2
% seco	39,5	agua evaporada [Kg/s]	1.649
Humedad absoluta (KgH ₂ O/Kg papel)	1,532	No Cilindros en contacto directo	12
Temperatura Hoja	35.4	Rata de evaporación [Kg/hr m ²]	31.67

Cilindro	Presión [barg]	Temperatura papel, e [C]	Temperatura papel, s [C]	Delta presión [barg]
1	0,26	35,4		0,3
2	0,88			0,3
3	0,28			0,3
4	0,88			0,3
5	0,08			0,3
6	0,88			0,3
7	0,32			0,3
8	0,88			0,3
9	0,42		76	0,3
10	0,88	76		0,3
17	0,88		83	0,3
18	1,38	79,6		0,3
29	1,38		86,8	0,3
30	1,88	78,6		0,3
41	1,88		90,5	0,3
42	1,88	79,7		0,3
47	1,88		98,9	0,3
49	0,2	46,5		0,3
50	1,1			0,3
51	0,25		76	0,3
52	1,59	76		0,3
61	1,59		95,2	0,3

Anexo H. Programa

Ver archivo adjunto.